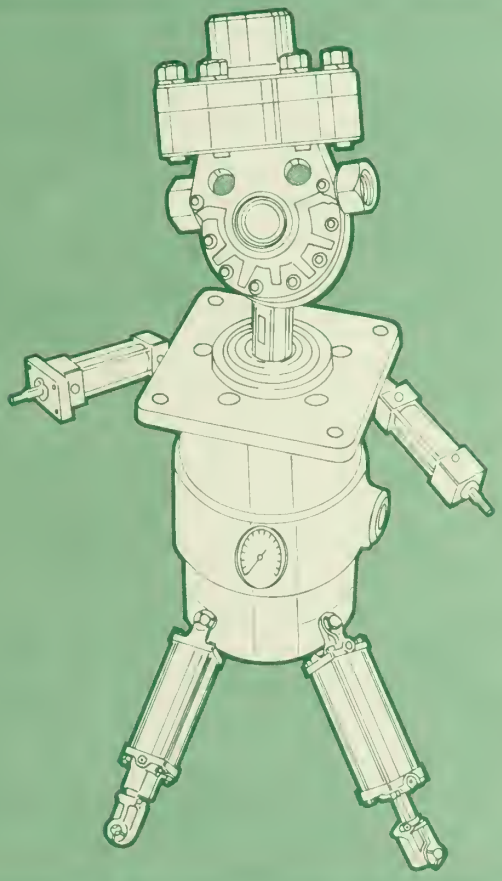
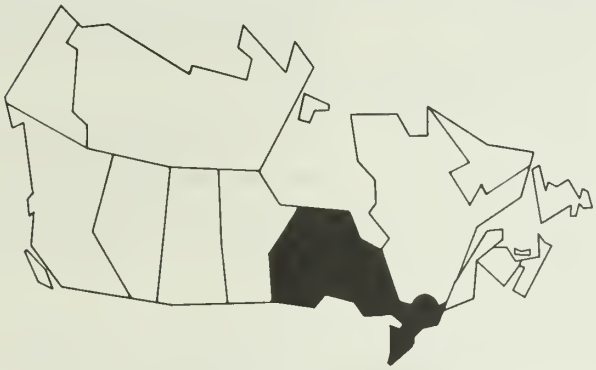
PUISSANCE HYDRAULIQUE

PUBLICATION 1665 1979



Agriculture Canada

PUBLICATION FÉDÉRALE/PROVINCIALE



CANADA/ONTARIO

SYSTÈMES HYDRAULIQUES

La présente publication a d'abord été publiée par le ministère de l'Agriculture et de l'alimentation de l'Ontario. Agriculture Canada a accepté de la publier conformément aux dispositions du Comité de coordination des publications agricoles sur le plan fédéral-provincial et régional.

D. J. GORDON, Génie agricole, Collège d'agriculture d'Ontario, Université de Guelph.

AGRICULTURE CANADA
PUBLICATION 1665
1979

TABLE DES MATIÈRES

Puissance hydraulique 3
Principes de l'hydraulique 3
Pompes hydrauliques 5
Moteurs hydrauliques 9
Transmissions hydrostatiques 10
Vérins hydrauliques 11
Soupapes hydrauliques 13
Circuits hydrauliques montés en série et en parallèle 16
Accumulateurs 21
Dispositifs d'attelage trois points 22
Directions assistées 23
Fluides hydrauliques 24
Dépannage des circuits hydrauliques 25
Facteurs de conversion (mesures métriques et impériales) 28

PUBLICATION 1665
Services d'information, Agriculture Canada, Ottawa K1A 0C7

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1979
N° de cat. A15–1665/1978F ISBN: 0-662-90035-9
Impression 1979 5M–7:79

PUISSANCE HYDRAULIQUE

L'expression «puissance hydraulique» désigne la canalisation d'un fluide en vue de lui faire effectuer un travail.

On appelle fluide toute substance pouvant s'écouler; toutefois, on se sert habituellement du terme pour parler d'un liquide ou d'un gaz (y compris l'air). La principale différence entre un liquide et un gaz réside dans le fait qu'un gaz est compressible alors qu'un liquide est pratiquement incompressible.

La notion de puissance hydraulique couvre aussi la pneumatique. En effet, dans le cas de l'hydraulique, l'agent de transmission d'énergie est un fluide, habituellement de l'huile; dans le cas de la pneumatique, cet agent est un gaz, habituellement de l'air.

L'hydraulique est uniquement un agent de transmission d'énergie et non une source d'énergie. L'énergie initiale nécessaire au fonctionnement d'un circuit hydraulique doit provenir d'une autre source comme un moteur à combustion interne, un moteur électrique ou une pompe manuelle.

La présente publication ne porte que sur les circuits hydrauliques à huile et plus particulièrement sur leur application et leur fonctionnement dans les tracteurs et les machines agricoles. Elle a été conçue dans le but de fournir à l'utilisateur et à l'opérateur de matériel hydraulique une compréhension pratique des principes impliqués; elle devrait ainsi l'aider à entretenir son matériel à le faire fonctionner avec une efficacité maximale.

Système métrique

La présente publication utilise le Système international qui constitue le nouveau système de mesure approuvé du Canada. Cependant, le Canada étant actuellement dans la période de transition au système métrique, il peut être utile d'expliquer certains des termes utilisés dans la présente publication:

PRINCIPES DE L'HYDRAULIQUE

Pression La pression pour les liquides et les gaz s'exprime en pascals (Pa), mais, comme cette unité correspond à une pression extrêmement faible, on utilise dans le cas des circuits hydrauliques le terme kilopascals (kPa) qui équivaut à 1000 pascals. Cette unité de mesure remplace les «livres par pouce carré (lb/po^2)» utilisées jusque là.

Masse S'exprime en grammes (g) ou kilogrammes (kg) équivalant à 1000 grammes; remplace les anciennes mesures de poids comme la livre ou l'once.

Force S'exprime en newtons (N) et remplace l'expression «livre-force». La force est la mesure de l'attraction que la terre exerce sur une masse, et qui exprime à celle-ci une accélération pendant la chute.

Débit On mesure le débit en litres à la minute (L/min), ce qui remplace l'expression gallons par minute.

Une liste complète de facteurs de conversion se trouve à la page 28.

Loi de Pascal

Selon la loi de Pascal, «toute pression exercée sur un liquide enfermé et au repos se transmet intégralement dans toutes les directions et perpendiculairement à chaque point de la surface du contenant».

Dans la figure 1, une masse de 100 kg est supportée par un piston ayant une surface de 500 mm^2. Cette masse exerce une force sur le piston qui exerce à son tour sur l'huile une pression d'environ 2000 kPa. Cette pression de 2000 kPa est transmise uniformément dans toutes les directions dans tout le circuit et peut être réutilisée ou prélevée en tout point du circuit. (Le calcul de la pression, de la force et de la surface est expliquée à la page 12 de la présente publication.)

Multiplication des forces

Pour approfondir les principes décrits ci-dessus, ajoutons un deuxième piston au circuit de la fig. 1. Ce deuxième piston a une surface de 5000 mm^2 (fig. 2). Étant donné que la pression (2000 kPa) est la même dans tout le circuit, une pression de 2000 kPa s'exerce sur chacun des 5000 mm^2 du plus gros piston; par conséquent, le gros piston peut supporter 10 fois la masse que supporte le petit piston, c'est-à-dire, dans notre exemple, une masse de 1000 kg. Étant donné que le petit piston a une surface de 500 mm^2 et que le gros piston a une surface de 5000 mm^2, le rapport de multiplication des forces est de 10

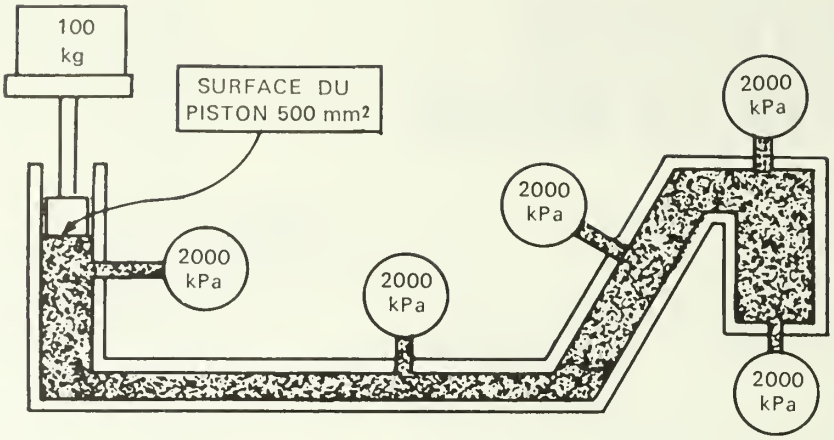


Figure 1. Loi de Pascal.

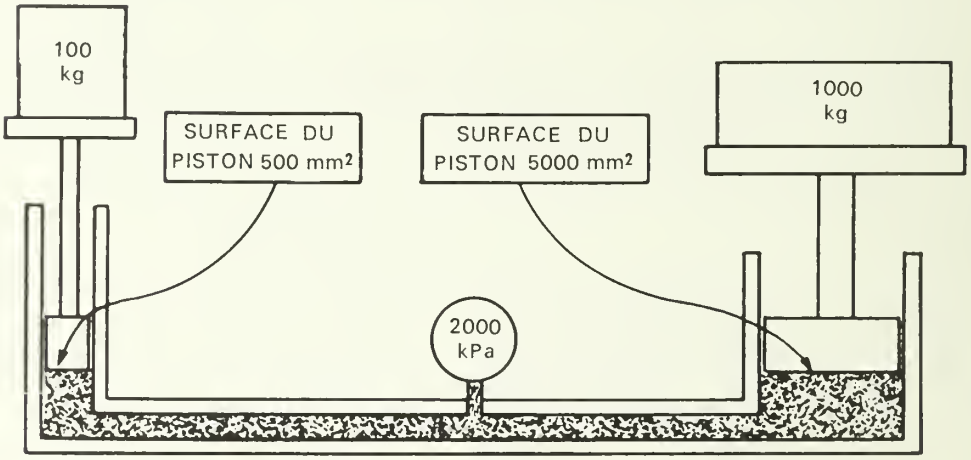


Figure 2. Multiplication des forces.

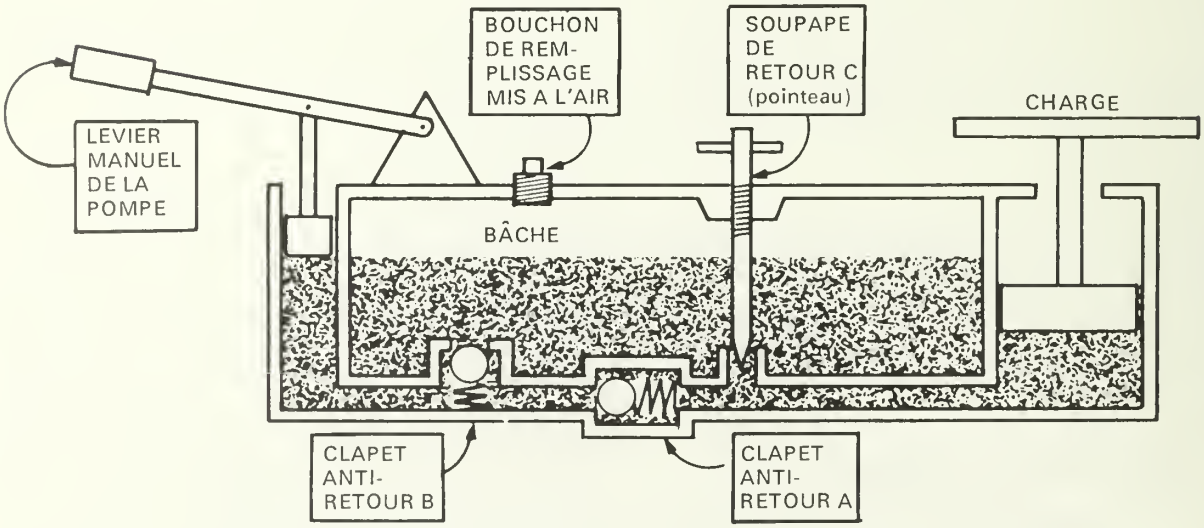


Figure 3. Vérin hydraulique.

pour 1. Cependant, l'avantage mécanique ainsi obtenu comporte un petit inconvénient: le petit piston doit se déplacer de 10 mm pour chaque 1 mm de déplacement du gros piston.

Vérin hydraulique

Si on ajoute quelques pièces au circuit de la fig. 2, on obtient un vérin hydraulique illustré dans la fig. 3. Pour empêcher le va-et-vient de l'huile entre les deux cylindres, il faut deux clapets anti-retour. Il s'agit simplement de clapets qui permettent le mouvement de l'huile dans une direction seulement. Lorsque le petit piston est poussé vers le bas par le levier manuel, l'huile fait ouvrir le clapet A et soulève le gros piston sur une courte distance. Afin de soulever ce dernier avantage, il faut relever le petit piston. La pression atmosphérique dans la bâche s'exerce sur l'huile qui ouvre le clapet B et va remplir le petit cylindre qui est maintenant prêt pour un deuxième mouvement. Pendant ce temps, le clapet A retient l'huile qui se trouve déjà dans le gros cylindre.

Pour faire descendre la charge, on ouvre le pointeau C pour permettre à l'huile se trouvant dans le gros cylindre de retourner à la bâche.
Le vérin hydraulique constitue un circuit hydraulique complet. Il comporte une pompe elle-même constituée du petit piston et de deux clapets anti-retour, d'une bâche et d'un cylindre pour soulever la charge.

POMPES HYDRAULIQUES

Une pompe est un dispositif qui convertit de l'énergie mécanique en déplacement hydraulique. Une pompe fournit un débit; elle ne crée pas de pression. *Il n'y a de pression à la sortie d'une pompe que s'il existe une résistance à l'écoulement de l'huile provenant de la pompe.*

Capacité d'une pompe

La capacité d'une pompe correspond au volume d'huile déplacé *pour chaque tour* de l'arbre d'entraînement de la pompe. La capacité est exprimée en millilitres (mL). On peut classer les pompes, dans les catégories non volumétriques et volumétriques.

Pompe non volumétrique

Les pompes de cette catégorie déplacent le fluide par la rotation d'un rotor. Ces pompes sont habituellement du type centrifuge et sont couramment utilisées pour faire circuler le liquide de refroidissement dans les moteurs refroidis à l'eau. Le débit de ces pompes n'est pas constant car il est inversement proportionnel à la résistance. On n'utilise donc les pompes non volumétriques que lorsque de très basses pressions sont impliquées et que le débit n'est pas un facteur important.

Pompe volumétrique

Les pompes volumétriques déplacent toujours la même quantité d'huile à chaque tour, *quels que soient le régime ou la résistance*. Il ne faut pas obstruer complètement l'écoulement d'une pompe volumétrique car la pression s'y accumulera jusqu'à ce que le corps de la pompe éclate. Ce sont des pompes volumétriques qu'on utilise dans les circuits hydrauliques à haute pression.

Débit

Le débit correspond au volume d'huile déplacé par unité de temps. Le débit est mesuré en litres à la minute (L/min). Pour calculer le débit d'une pompe, il faut en multiplier la capacité par le régime (vitesse de la pompe en tours/minute). Par exemple, considérons une pompe d'une capacité de 1,5 mL par tour à 1000 r/min. Le débit en est 1,5 × 1000 mL/min. = 1500 mL/min.

Les formules relatives au débit, à la capacité et au régime sont les suivantes:

Débit = capacité × régime
Capacité = débit ÷ régime
Régime = débit ÷ capacité.

Pompe volumétrique à débit variable

Il s'agit d'une pompe dont on peut faire varier le débit par tour soit manuellement soit automatiquement. Si une pompe à débit variable d'une capacité maximale de 1 mL par tour fonctionne à un régime de 1000 r/min, il est possible d'en faire varier le débit de 0 à 1000 mL/min et de le maintenir n'importe où entre ces deux limites. On peut aussi inverser, à l'aide de commandes mécaniques, le débit de ces pompes (fig. 8 et 16).

Pompe asservie

Une pompe asservie est une pompe à débit variable munie d'un dispositif sensible à la pression du circuit. Quand la pression du circuit atteint une valeur donnée dans le canal pilote, la pompe est automatiquement arrêtée et son débit est nul tant que la pression du circuit reste maximale (fig. 9).

Pression atmosphérique

En tout temps, l'air qui nous entoure est sous pression. Cette pression varie selon l'altitude. La pression atmosphérique normale est de 101,325 kPa au niveau de la mer, valeur qu'on peut arrondir à 100 kPa dans la plupart des calculs. Lorsque la pression baisse au-dessous de la pression atmosphérique, elle devient «vide»

ou «dépression». Le vide est absolu lorsqu'il n'y a plus d'air et que la pression a été réduite à zéro.

Pression manométrique et pression absolue

Un manomètre ordinaire indique la pression supérieure à la pression atmosphérique. Ainsi, un manomètre non branché indique zéro alors qu'en réalité il est soumis à la pression atmosphérique. Les manomètres sont calibrés de cette façon pour des raisons pratiques et pour la facilité d'emploi; cependant, les manomètres de haute précision sont calibrés pour indiquer la pression atmosphérique également. On les appelle «manomètres de pression absolue»: et c'est ce qu'ils indiquent. Un manomètre de pression absolue non branché indique la pression atmosphérique, c'est-à-dire environ 100 kPa.

Canalisations d'aspiration et d'alimentation

Une pompe est alimentée par la pression atmosphérique qui s'exerce dans la bâche et qui pousse l'huile dans l'orifice d'aspiration. Quand la pompe fonctionne, la pression à son orifice d'aspiration devient inférieure à la pression atmosphérique, ce qui crée un vide partiel dans la canalisation d'aspiration. Étant donné qu'un fluide se déplace toujours d'un point soumis à une haute pression vers un point soumis à une basse pression, il peut s'écouler. On peut donc dire que l'huile est poussée par la pression atmosphérique, et non aspirée dans la pompe.

C'est pour cette raison que les canalisations d'aspiration d'une pompe sont extrêmement importantes pour le fonctionnement de cette dernière. Les dimensions de la canalisation d'aspiration doivent être proportionnelles aux dimensions de la pompe afin qu'aucune résistance supplémentaire ne s'oppose à l'écoulement du liquide de la bâche à la pompe. Si les canalisations d'aspiration entraînent trop de pertes de charge d'une façon ou d'une autre, la pompe ne peut recevoir le volume d'huile requis lorsque la pression atmosphérique est très limitée et ne peut vaincre une trop forte résistance. Les problèmes pouvant se produire du côté aspiration de la pompe sont traités en page 25 sous la rubrique «Dépannage des circuits hydrauliques».

Flexibles et tuyauterie

Les dimensions d'une canalisation sous pression sont limitées par les pertes de charge dues au frottement dans le circuit. Le tableau 1 ci-dessous constitue un guide pour le choix des dimensions minimales de canalisation. S'assurer que toutes les canalisations et raccords utilisés du côté haute pression d'un circuit peuvent résister à une pression maximale égale à la pression d'ouverture du clapet de sûreté du circuit. Ne jamais utiliser de la tuyauterie galvanisée pour aucun composant d'un circuit hydraulique car le revêtement contaminera l'huile et endommagera les pièces à ajustage précis.

Calcul des dimensions des canalisations La vitesse du fluide dans les canalisations est le facteur dont il faut tenir compte dans le calcul des dimensions des canalisations. Dans les canalisations d'aspiration à basse pression, le fluide ne doit pas atteindre une vitesse supérieure à 1,25 m/s. Dans les canalisations sous pression, la vitesse du fluide ne doit pas être supérieure à 4,6 m/s. Afin de calculer les dimensions des canalisations, utiliser la formule suivante ou consulter le tableau 1.

Section de la canalisation = débit ÷ vitesse. (pour la vitesse, utiliser soit 1,25 m/s, soit 4,6 m/s comme on l'explique ci-dessus)

Pompes à engrenages

Le principe de fonctionnement des pompes à engrenages (aussi appelées à dentures) (fig. 4 et 5) est simple: lors de la rotation des engrenages, le liquide emprisonné entre les dents des engrenages et le boîtier (A, fig. 4) est transporté du côté aspiration au côté refoulement (B). Étant

TABLEAU 1. DIMENSIONS DES CANALISATIONS HYDRAULIQUES

Canalisation hydraulique Diamètre interne		Canalisation d'aspiration Débit maximum	Canalisation de pression Débit maximum
Impériale	Métrique*	L/min	L/min
¼ po	6,4 mm	2,5	9
⅜ po	9,5 mm	5,5	20
½ po	12,7 mm	10	35
⅝ po	15,9 mm	15	55
¾ po	19 mm	22	80
1 po	25,4 mm	40	140
1¼ po	32 mm	60	220
1½ po	38 mm	90	315

*On ignore si les tuyeaux seront disponibles dans toutes ces dimensions.

donné qu'il n'y a aucun espace entre les deux roues dentées (C) où l'huile pourrait se loger, cette dernière doit sortir par l'orifice de refoulement. Une roue est entraînée, l'autre suit. Il n'est pas nécessaire de caler ces engrenages.

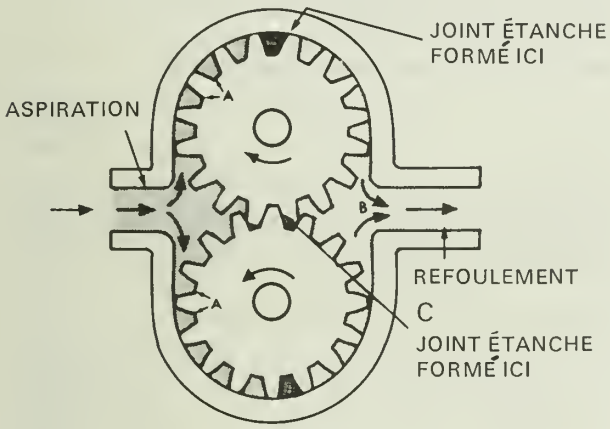


Figure 4. Diagramme d'une pompe à engrenage externe.

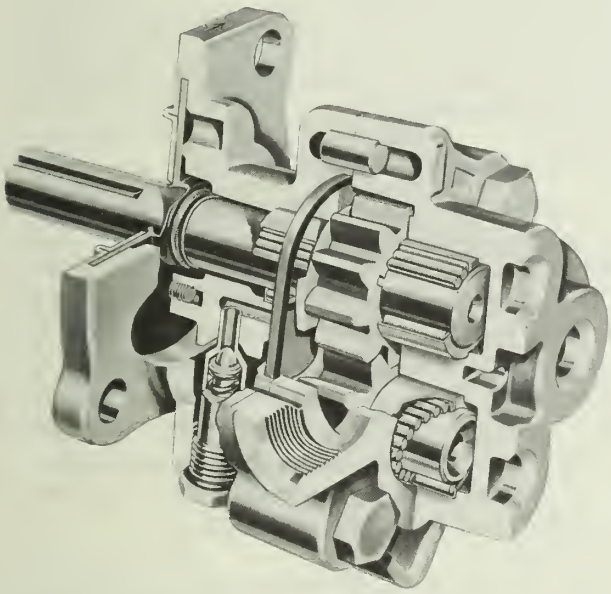


Figure 5. Coupe transversale d'une pompe à engrenage externe. Cette pompe est munie d'un clapet de sûreté intégré.

Pompes à engrenage interne (denture intérieure)

Les pompes à engrenage interne comportent un pignon à l'intérieur d'une denture intérieure. Il existe plusieurs modèles de pompes à engrenage interne, dont les pompes de type rotatif, «gerotor» ou excentriques de même que certains moteurs hydrauliques.

Dans la pompe gerotor (fig. 6), la couronne à denture intérieure tourne à l'intérieur d'une cavité à ajustage précis et transporte de l'huile entre ses dents. Le pignon qui entraîne la couronne dentée doit comporter une dent de moins que la couronne dentée. La forme des dents de l'engrenage a été conçue de façon que chaque dent du pignon glisse toujours sur la surface de la couronne dentée. Ces pompes peuvent fonctionner plus silencieusement qu'une pompe comparable à engrenages externes; toutefois, elles sont facilement endommageables et toute particule peut les gripper.

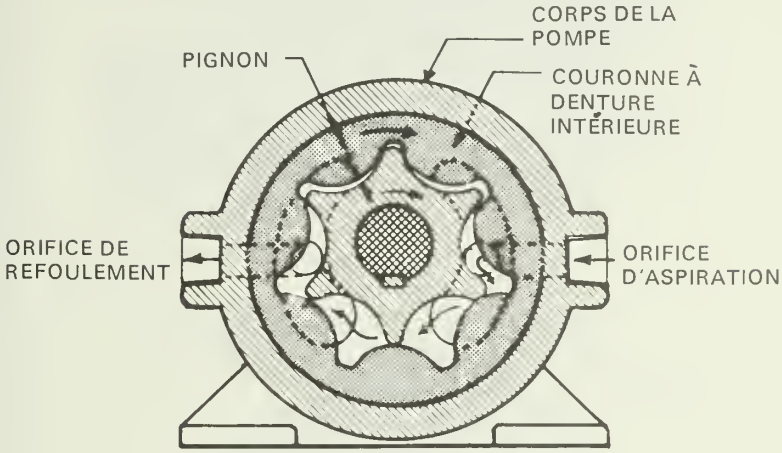


Figure 6. Pompe «gerotor».

Pompe à palettes

La pompe à palettes se compose d'un rotor (fig. 7) dans lequel sont pratiquées des fentes. Le rotor est l'élément entraîné de la pompe. Dans les fentes se trouvent des palettes plates libres de glisser dans les deux directions.

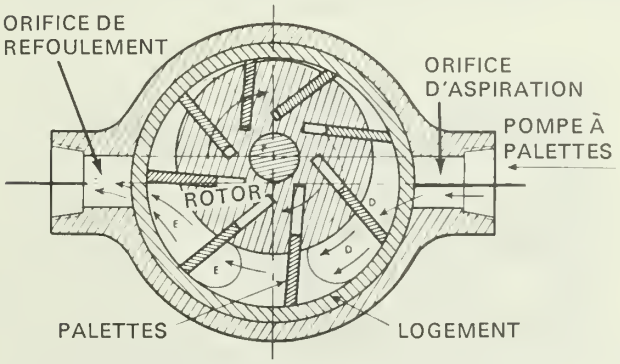


Figure 7. Pompe à palettes non équilibrées.

Dans le cas de la pompe illustrée, le rotor tourne dans le sens horaire et les palettes frottent sur les parois du logement. Quand le rotor tourne, le volume entre deux palettes est réduit

et devient presque nul. L'huile aspirée en D dans ces ouvertures est transportée au point de refoulement E. Étant donné que le volume est très réduit en ce point et que l'huile est incompressible, cette dernière est forcée de sortir par l'orifice de refoulement.

Les palettes de cette pompe sont maintenues contre les parois du logement par une ou l'ensemble des méthodes suivantes:

1. on peut diriger la pression de l'huile provenant du côté du refoulement de la pompe dans les fentes à l'arrière des palettes de façon à pousser ces dernières vers l'extérieur;
2. la force centrifuge tend à maintenir les palettes contre les parois du logement dans le cas des pompes à régime élevé;
3. on installe parfois des ressorts dans les fentes derrière les palettes de façon à les maintenir fermement contre les parois.

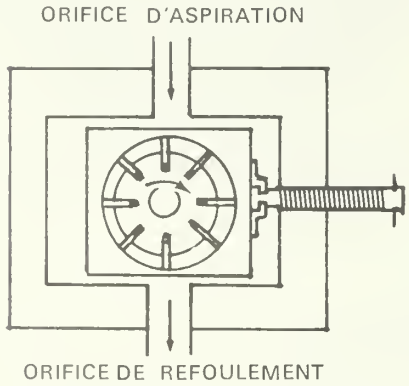


Figure 8. Pompe à palettes à débit variable. Une commande manuelle fait varier le débit de la pompe.

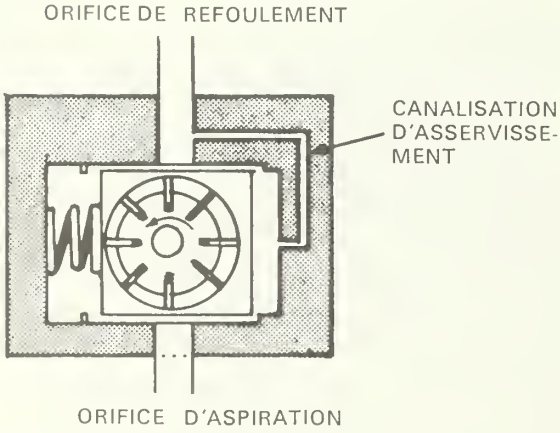


Figure 9. Pompe à palettes à pression hydraulique. Cette pompe cesse de fonctionner lorsque la pression transmise par la canalisation d'asservissement pousse le logement du rotor au centre.

L'usure normale ne réduit pas outre mesure l'efficacité car les palettes sortent des fentes pour être en contact avec les parois du logement. La présence de saletés et de cambouis dans une pompe à palettes fait gripper celles-ci dans leur fente et nuit sérieusement au fonctionnement de la pompe.

Pompe à palettes non-équilibrée

On dit d'une pompe qu'elle est non équilibrée lorsqu'une forte charge s'exerce sur le côté refoulement de l'arbre de la pompe et non sur l'autre côté. Toutefois, ce type de pompe comporte un avantage: on peut en faire varier le débit comme l'indiquent les fig. 8 et 9.

Pompe à palettes à débit variable

La fig. 8 illustre une pompe à palettes dont on peut déplacer mécaniquement la tige du logement intérieur même lorsque la pompe fonctionne. On peut ainsi faire varier le débit, dans les deux directions, de zéro au maximum.

Pompe asservie

La fig. 9 illustre une pompe semblable mais, dans ce cas, c'est une pression hydraulique qui pousse le logement contre un ressort. Ainsi, cette pompe se déplace pour atteindre une position neutre (débit nul) lorsqu'une pression préalablement déterminée est atteinte.

Pompe à palettes équilibrée

La pompe à palette illustrée dans la fig. 7 est une pompe non équilibrée parce qu'il y a une charge plus forte sur un côté de l'arbre que sur l'autre. La pompe à palettes équilibrée (fig. 10) comporte deux orifices d'aspiration et deux orifices de refoulement, chacune étant opposée à l'autre de 180° pour que la charge s'exerce sur l'arbre de façon équilibrée. Le logement de forme elliptique permet deux cycles de pompage simultanés, ce qui accroît la capacité de la pompe proportionnellement à ces dimensions.

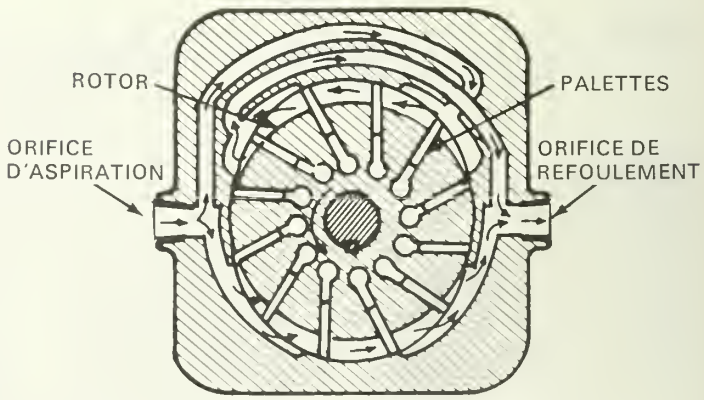


Figure 10. Pompe à palettes équilibrées.

Pompe à piston

Plusieurs types de pompes à piston sont utilisés, le plus simple étant la pompe alternative illustrée dans la fig. 3 (vérin hydraulique). Pour que leur fonctionnement soit plus régulier elles comportent habituellement plus d'un cylindre, tout comme les moteurs à essence qui comportent plusieurs cylindres pour accroître leur puissance et leur régularité de fonctionnement.

Pompe à pistons axiaux

Dans la pompe à pistons axiaux, ces derniers se déplacent parallèlement à l'axe d'entraînement de la pompe. Deux types de pompes à pistons axiaux sont illustrés. Dans la figure 11, on peut voir une pompe à plateau oscillant munie de clapets anti-retour. Les cylindres sont situés dans le corps principal de la pompe et le plateau oscillant tourne pour assurer le va-et-vient des pistons. La fig. 12 illustre une pompe à pistons axiaux dont le bloc-cylindres tourne et s'appuie sur une plaque comportant des orifices. Les pistons s'appuient sur un palier de butée placé en angle. C'est cet angle du palier de butée qui détermine le débit de la pompe. La pompe illustrée dans la fig. 12 est munie d'un palier de butée à angle fixe; toutefois, on peut voir à l'intérieur d'une transmission hydrostatique (fig. 16) le même type de pompe munie d'une plaque de butée qui, en réglant la course des pistons, convertit la pompe en une pompe à débit variable.

Pompes à pistons radiaux

Dans une pompe à pistons radiaux, (fig. 13) les pistons sont disposés en «étoile» autour de l'arbre.

Comme dans le cas de la pompe à pistons axiaux, on rencontre des pompes à pistons radiaux à débit fixe ou variable.

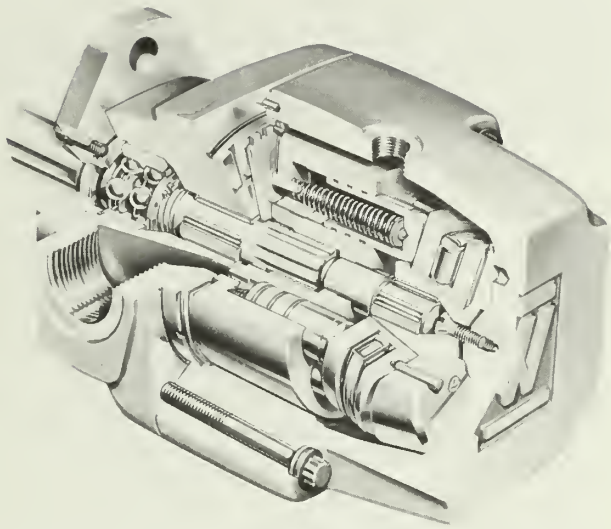


Figure 12. **Pompe à pistons axiaux (à bloc-cylindre rotatif).**

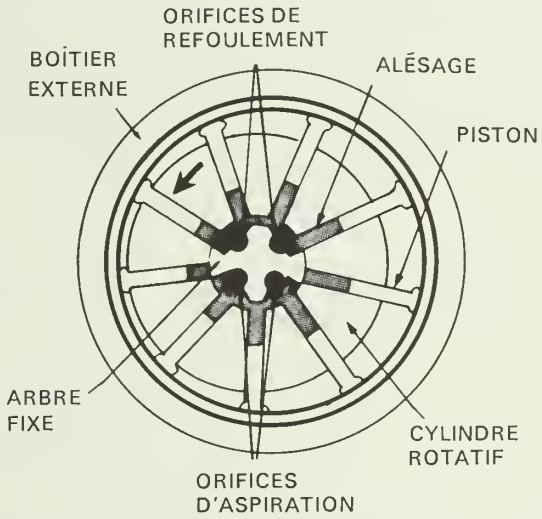


Figure 13. **Diagramme d'une pompe à pistons radiaux.**

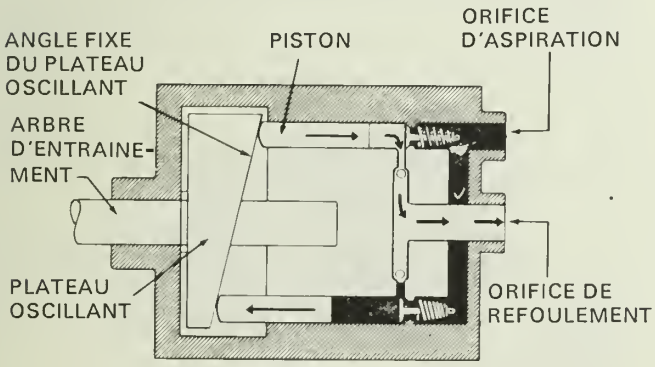


Figure 11. **Pompe à pistons axiaux (à plateau oscillant).**

MOTEURS HYDRAULIQUES

Un moteur hydraulique convertit la pression et le débit en énergie mécanique utilisable tout comme un moteur électrique le fait avec du courant.

Un moteur hydraulique est fondamentalement semblable à une pompe hydraulique. En réalité, nombre de pompes hydrauliques peuvent servir de moteurs hydrauliques.

Tout comme les pompes, les moteurs hydrauliques peuvent être du type à engrenages, à palettes ou à pistons. La principale différence est qu'une pompe, qui est entraînée par une source

d'énergie mécanique (un moteur par exemple, convertit cette dernière en déplacement hydraulique alors qu'un moteur hydraulique est entraîné par un déplacement hydraulique et convertit cette dernière en énergie mécanique.

Dans la fig. 14, on montre un moteur à engrenages externes. La pression d'huile est appliquée à l'orifice d'aspiration et, comme le précise la loi de Pascal, une pression égale est appliquée à tous les points de l'engrenage en contact avec l'huile aspirée. Par conséquent, une force égale s'exerce sur les deux côtés des dents marquées «A», mais comme un seul côté des dents marquées «B» est soumis à la pression, les dents sont poussées dans la direction des flèches. On peut maintenant constater que les deux pignons sont entraînés dans des directions opposées. L'huile est prisonnière des dents et transportée à l'orifice de refoulement d'où elle retourne à la bâche.

La fig. 15 montre un moteur à palettes équilibré. Les moteurs à palettes doivent comporter un dispositif destiné à maintenir les palettes contre la paroi car, contrairement à la pompe à palettes, les palettes ne sont pas maintenues en position par la force centrifuge. Le moteur illustré comporte des ressorts derrière les palettes.

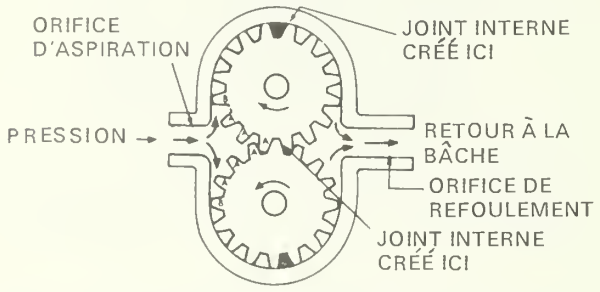


Figure 14. Diagramme d'un moteur à engrenages externes.

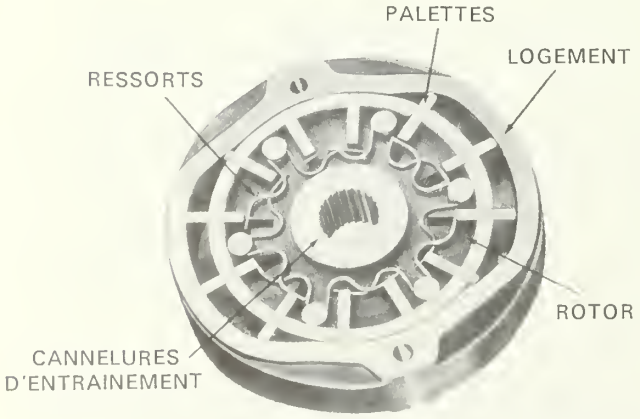


Figure 15. Coupe transversale d'un moteur à palettes.

TRANSMISSIONS HYDROSTATIQUES

Les transmissions hydrostatiques transmettent la puissance à un appareil entraîné sans faire appel à un embrayage mécanique ou à une série de démultiplications par engrenages comme c'est le cas des transmissions mécaniques.

La transmission hydrostatique est en réalité l'accouplement d'une pompe hydraulique à un ou plusieurs moteurs hydrauliques qu'elle doit entraîner. Une transmission hydrostatique peut être montée en un seul ensemble (fig. 16) ou de façon que la pompe soit en un endroit et que le (ou les) moteur(s) soit (soient) placé(s) en un autre endroit et lui soit (soient) relié(s) par une tubulure à haute pression. Quelle qu'en soit la disposition, le circuit comporte toujours des clapets anti-retour, des clapets de sûreté et une bâche étant donné que la transmission constitue un circuit hydraulique complet.

La plupart des transmissions hydrostatiques sont munies d'une pompe à débit variable et réversible à palettes ou à pistons. Le moteur peut être à débit fixe ou variable selon le couple et la vitesse nécessaires; dans la fig. 16, on voit une transmission hydrostatique utilisant une pompe à piston à débit variable munie d'une commande manuelle faisant varier dans les deux sens l'angle du palier de butée et par conséquent, le débit, de zéro au maximum. Le moteur de cette transmission est un moteur à débit fixe.

Lorsque le levier de commande est tourné légèrement, la course du piston de la pompe est raccourcie et un faible débit d'huile se rend aux pistons du moteur qui tourne ainsi à bas régime. Si on tourne davantage le levier de commande, la course du piston est accrue, une plus grande quantité d'huile est pompée et le moteur tourne plus vite. De cette façon, on peut obtenir un nombre infini de régimes dans les deux sens sans qu'il y ait de paliers entre les régimes comme dans le cas des transmissions mécaniques.

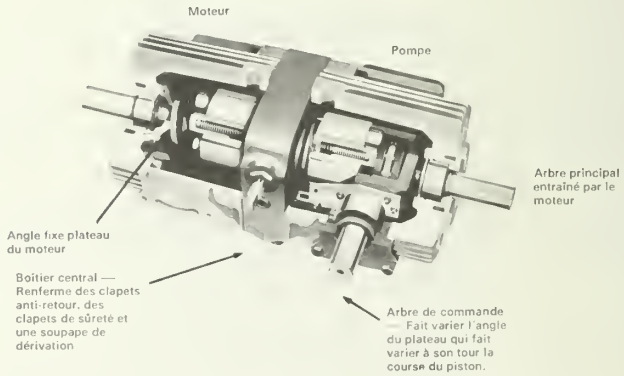


Figure 16. Coupe d'une transmission hydrostatique.

VÉRINS HYDRAULIQUES

Les vérins hydrauliques sont de loin la méthode la plus populaire d'utilisation d'un fluide sous pression pour accomplir un travail.

Il y a deux catégories principales de vérins: les vérins à effet simple et les vérins à effet double. Les vérins à effet simple (fig. 17 et 18) utilisent le déplacement hydraulique pour déplacer le piston et soulever la charge mais le piston doit être rappelé par gravité ou par des ressorts. Les vérins à effet double (fig. 19 et 20) utilisent la pression hydraulique pour l'extension et le retour du piston.

Vérins à effet simple

Les vérins à effet simple peuvent être à piston ou à tige. Le vérin à piston illustré dans la fig. 17 est un exemple typique des vérins intégrés au système de levage arrière des tracteurs. Nombre de ces vérins à effet simple à piston sont construits de la même façon que le vérin à effet double (fig. 19), sauf qu'un seul orifice d'admission est utilisé pour l'huile et l'autre orifice sert de mise à l'air libre.

Le vérin à tige (fig. 18) ne comporte pas de piston et la pression de l'huile ne s'exerce que sur l'extrémité de la tige, ce qui la fait sortir du cylindre. Les vérins de ce type sont très simples et, étant donné qu'aucun usinage de précision n'est requis à l'intérieur du cylindre, ce sont des vérins peu coûteux. La seule défectuosité que peut présenter un vérin à tige est l'usure du joint d'extrémité qui peut causer une fuite d'huile.

Vérins à effet double

Les vérins à effet double peuvent être du type à une tige (fig. 19) ou à deux tiges opposées (fig. 20). Le vérin à une tige est le vérin hydraulique le plus communément employé. Il est actionné dans les deux sens par la pression hydraulique; toutefois, étant donné que le piston comporte une tige sur un de ces côtés, la surface ce de côté-là se trouve réduite.

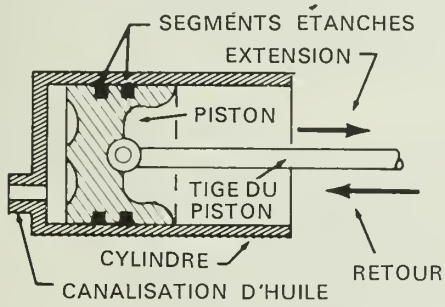


Figure 17. Diagramme d'un vérin hydraulique à effet simple.

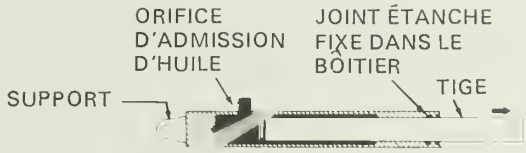


Figure 18. Vérin à tige.

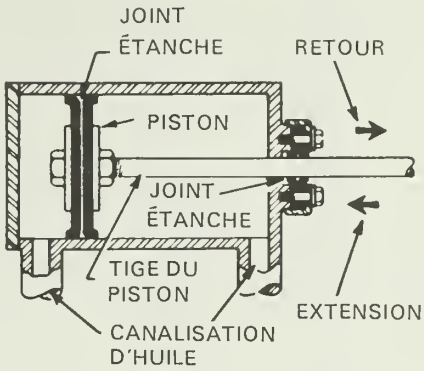


Figure 19. Vérin hydraulique à effet double (à une tige).

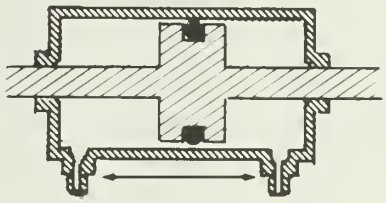


Figure 20. Vérin hydraulique à effet double (à deux tiges opposées).

Joints et garnitures

Les pistons de tous les vérins hydrauliques doivent être munis de segments ou de joints pour empêcher la pression de faire passer l'huile entre le piston et les parois du cylindre. Les cylindres des vérins à effet double doivent aussi être étanchéifiés à la sortie du cylindre.

On utilise plusieurs types de joints. La fig. 17 donne un exemple d'utilisation de segments d'acier et la fig. 19, celui des joints synthétiques ou en cuir. Toutefois, le joint torique (fig. 20) est probablement le joint le plus couramment employé dans les machines agricoles et industrielles.

Lorsqu'on démonte pour une raison ou pour une autre un cylindre, une pompe ou une soupape, toujours remplacer les joints d'étanchéité. Même si les joints ne fuyaient pas avant le démontage, ils fuiront très probablement après la pose. Il est également important de vérifier que les arbres et les parois du cylindre ne soient pas rayées ni piquées.

TABLEAU 2. TABLEAU DE VALEURS RELATIVES AU VÉRIN

Les valeurs indiquées s'appliquent à la course de sortie du piston des vérins à effet simple ou des vérins à une tige. Pour la course de rétraction, déduire d'abord la surface de la tige de la surface du piston.

Pour la vitesse des vérins, multiplier la vitesse indiquée par le débit (L/min) du vérin.

diamètre du piston ou de la tige (mm)	surface du piston ou de la tige (mm²)	Force maximale et capacité de levages aux pressions indiquées						Vitessse du vérin pour L/min de débit (mm/s)
		5 000 kPa		10 000 kPa		15 000 kPa		
		force (kN)	masse (kg)	force (kN)	masse (kg)	force (kN)	masse (kg)	
10	80	382	39	764	78	1,146	117	213
15	180	862	88	1,724	176	2,587	264	95
20	310	1,538	157	3,077	314	4,616	471	53
25	490	2,401	245	4,802	490	7,203	735	34
30	710	3,459	353	6,919	706	10,378	1 059	24
35	960	4,713	481	9,427	962	14,141	1 443	17
40	1 260	6,154	628	12,308	1 256	18,463	1 884	13
45	1 590	7,791	795	15,582	1 590	23,373	2 385	10
50	1 960	9,604	980	19,208	1 960	28,812	2 940	8,5
55	2 370	11,637	1 187	23,275	2 375	34,912	3 562	7,0
60	2 830	13,852	1 413	27,704	2 827	41,557	4 240	5,8
65	3 320	16,258	1 659	32,516	3 318	48,774	4 977	5,0
70	3 850	18,865	1 925	37,730	3 850	56,595	5 775	4,3
75	4 400	21,560	2 200	43,120	4 400	64,680	6 600	3,8
80	5 020	24,500	2 500	49,000	5 000	73,500	7 500	3,3
85	5 670	27,807	2 837	55,615	5 675	83,422	8 512	2,9
90	6 360	31,164	3 180	62,328	6 360	93,492	9 540	2,6
95	7 080	34,692	3 540	69,384	7 080	104,076	10 620	2,3
100	7 850	38,465	3 925	76,930	7 850	115,395	11 775	2,1
110	9 500	46,550	4 750	93,100	9 500	139,650	14 250	1,8
120	11 300	55,370	5 650	110,740	11 300	166,110	16 950	1,5
130	13 270	65,023	6 635	130,046	13 270	195,069	19 905	1,2
140	15 400	75,460	7 700	150,920	15 400	226,380	23 100	1,0
150	17 670	86,583	8 835	173,166	17 670	259,749	26 505	0,9

Calcul de la force, de la pression et de la surface d'un vérin

La force d'un vérin (mesurée en newtons) ou la capacité de levage (masse) dépend de deux facteurs: (1) la pression pouvant s'exercer sur le piston dans le cylindre (2) la surface du piston soumis à la pression.

La fig. 2 montrait comment une charge de 100 kg appliquée sur une surface de 500 mm² produisait une pression de 2000 kPa. Étant donné que la masse de 100 kg exerce une force sur le piston à cause de l'attraction terrestre, on peut dire que cette force est approximativement 1000 N. Cette force qui s'exerce sur la masse de 100 kg est plus exactement de 980 N, car la valeur exacte de la gravité qui sert de norme internationale est de 9,80665 m/s². Pour trouver la force exacte exercée par une masse multipliez cette masse (en kg) par 9,8. Dans la plupart des calculs relatifs à des circuits hydrauliques, on peut arrondir cette valeur (9,8) à 10 pour faciliter les calculs. Dans les formules qui suivent, on utilise la valeur 10 plutôt que 9,8 car elle permet d'obtenir des résultats raisonnablement précis pour les circuits hydrauliques.

Formules Les formules fondamentales pour calculer les dimensions des vérins peuvent être exprimées des trois façons suivantes:

$$\text{Force} = \text{pression} \times \text{surface}$$

$$\text{Pression} = \frac{\text{force}}{\text{surface}}$$

$$\text{Surface} = \frac{\text{force}}{\text{pression}}$$

Pour convertir une force exprimée en kN en une masse exprimée en kg, multiplier la force (kN) par 100.

Pour calculer *la surface d'un piston* nécessaire pour soulever une certaine masse (la charge sur le piston) utiliser la formule suivante:

$$\text{Surface (mm}^2) = \frac{\text{masse (kg)} \times 10\,000}{\text{pression (kPa)}}$$

Pour calculer la *pression* requise pour déplacer une certaine masse, utiliser la formule suivante:

$$\text{Pression (kPa)} = \frac{\text{masse (kg)} \times 10\,000}{\text{surface (mm}^2)}$$

Pour calculer la *masse* (charge) pouvant être soulevée par un certain piston ayant une pression maximale fixe, utiliser la formule suivante:

$$\text{Masse (kg)} = \frac{\text{pression (kPa)} \times \text{surface (mm}^2)}{10\,000}$$

Calcul de la vitesse d'un vérin

La vitesse de déplacement du piston dépend du débit (L/min) et de la surface du piston. Étant donné que la rétraction d'un vérin à une tige est plus rapide que son extension, on doit, lorsqu'on calcule la vitesse de rétraction, tenir compte de la surface de l'extrémité de la tige.

Pour calculer la vitesse du vérin, utiliser la formule suivante:

$$\text{Vitesse (mm/s)} = \frac{\text{débit (L/min)} \times 1\,000\,000}{\text{surface (mm}^2) \times 60}$$

Pour obtenir le débit requis pour produire une certaine vitesse:

$$\text{Débit (L/min)} = \frac{\text{vitesse (mm/s)} \times \text{surface (mm}^2) \times 60}{1\,000\,000}$$

Pour trouver la surface lorsqu'on connaît déjà la vitesse et le débit:

$$\text{Surface (mm}^2) = \frac{\text{débit (L/min)} \times 1\,000\,000}{\text{vitesse (mm/s)} \times 60}$$

Formule pour surface et cercle

Surface d'un cercle = rayon au carré × 3,1416
ou diamètre au carré × 0,7854
Volume d'un cylindre = surface du piston × course

Formules pour la puissance d'entrainement d'une pompe

$$\text{puissance (kW)} = \frac{\text{débit (L/min)} \times \text{Pression (kPa)}}{50\,000}$$

$$\text{Débit (L/min)} = \frac{\text{puissance (kW)} \times 50\,000}{\text{pression (kPa)}}$$

$$\text{Pression (kPa)} = \frac{\text{puissance (kW)} \times 50\,000}{\text{débit (L/min)}}$$

SOUPAPES HYDRAULIQUES

Les soupapes sont des dispositifs mécaniques qui règlent la pression, la direction, le volume et le débit de l'huile dans un circuit hydraulique.

Soupape de sûreté

On utilise des soupapes de sûreté pour protéger un circuit hydraulique comme le fait un fusible dans le cas d'un circuit électrique.

Dans la partie consacrée aux pompes hydrauliques (page 5), on parlait des pompes volumétriques qui déplacent une certaine quantité d'huile à chaque tour. La pression du côté refoulement de la pompe n'est créée que s'il y a résistance à l'écoulement de l'huile provenant de la pompe. Étant donné que la pompe est volumétrique, la pression continuera à s'accumuler si la résistance est assez forte. Par conséquent, on atteindrait un point où la pression serait trop forte pour les canalisations et les raccords ou même pour le corps de la pompe lui-même, et une des parties du circuit éclaterait. Afin d'empêcher cela, on équipe tous les circuits hydrauliques de soupapes de sûreté.

On rencontre deux types de soupapes de sûreté, pré-réglée ou réglable, qui accomplissent le même rôle: limiter la pression maximale pouvant s'accumuler en tout point dans le circuit hydraulique.

Clapets de sûreté

Les clapets sont conçus de façon que la pression s'exerce sur une bille ou un piston qui est habituellement maintenu en position fermée par un puissant ressort (fig. 21). La vis de réglage fait varier la tension du ressort qui exige ainsi plus ou moins de pression pour soulever la bille. Lorsque la pression dans le circuit est supérieure à la tension du ressort, l'huile retourne à la bâche par un conduit de retour. Ce type de clapet de sûreté s'applique surtout aux circuits à basses pressions, ou à faible débit.

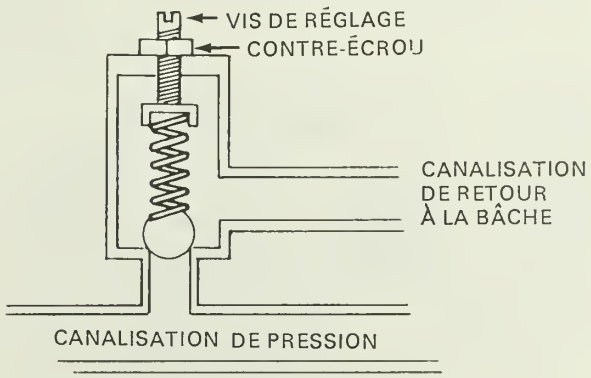


Figure 21. Diagramme d'un clapet de sûreté.

Soupapes de sûreté à clapets pilotes

Une soupape de sûreté doit permettre la circulation à plein débit dans le circuit. Dans le cas des circuits à débit élevé, si on utilisait un clapet de sûreté ordinaire comme celui illustré dans la fig. 21, il faudrait que la surface de la bille exposée à la pression soit passablement grande pour permettre une ouverture suffisante. Dans ce cas, la tension du ressort devrait être proportionnelle. Par exemple, dans le cas d'un clapet de sûreté ordinaire, pour qu'une bille ou un piston de 300 mm^2 de surface résiste à une pression de 15 000 kPa, il faudrait que le ressort puisse résister à une charge équivalente à une masse de 450 kg. Un ressort de cette grosseur serait beaucoup trop gros pour qu'on puisse en équiper un circuit hydraulique (il serait environ de la même grosseur qu'un ressort de suspension d'une roue d'automobile). On utilise donc des soupapes de sûreté à clapet pilote pour éviter l'emploi de ressorts de cette grosseur.

Dans la fig. 22, on constate que le clapet principal est maintenu en position fermée par un ressort à faible tension et aussi par la pression hydraulique qui passe par l'orifice. Par conséquent, tout accroissement de pression s'exercera sur les deux côtés du clapet principal sans le déplacer. Toutefois, si la pression atteint le niveau de déclenchement du petit clapet pilote (dont une très petite surface est exposée à la pression), ce dernier s'ouvrira et permettra à un débit minime de retourner à la bâche. *Lorsqu'il y a un débit dans un orifice, il s'ensuit toujours une baisse de pression.* Lorsque cette baisse de pression est supérieure à la faible tension du ressort, le clapet principal s'ouvre et permet au plein débit du circuit de retourner à la bâche.

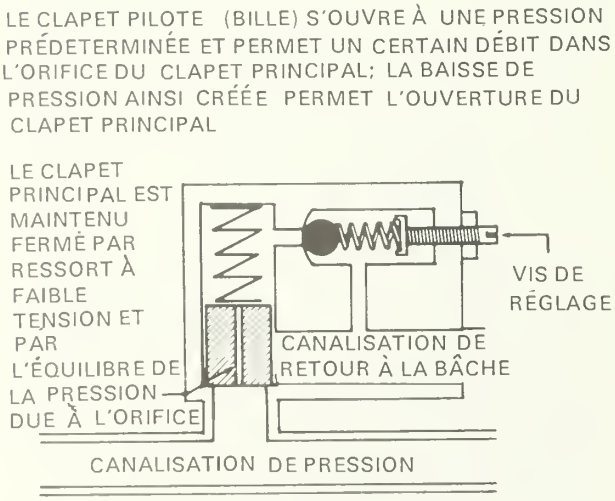


Figure 22. Soupape de sûreté à clapet pilote.

Réglage de la soupape de sûreté

Pour obtenir la pression du fonctionnement du circuit, toujours consulter les spécifications du fabricant et ne jamais essayer de régler une soupape de sûreté sans manomètre.

Le réglage de la soupape de sûreté est le plus important réglage dans le cas des circuits hydrauliques. On sait pourquoi la pression ne doit pas atteindre un niveau trop élevé; examinons maintenant l'effet d'un réglage trop bas d'une soupape de sûreté. Dans un circuit hydraulique, la pression ne peut jamais dépasser la pression de déclenchement de la soupape de sûreté; par conséquent, si le réglage de la soupape est trop bas, le circuit hydraulique ne peut accomplir le travail pour lequel il a été conçu. De plus, si ce réglage est trop bas, la durée nécessaire pour que l'huile repasse dans la soupape est plus longue que normale, créant ainsi dans le circuit de la chaleur pouvant endommager les joints et les raccords.

Pour régler une soupape de sûreté, on *doit* installer un manomètre du côté refoulement (côté pression) de la pompe. Cette dernière étant en marche, soumettre le circuit à sa charge maximale. Si le circuit comporte un cylindre hydraulique, faire pénétrer le piston jusqu'au fond et laisser la soupape de commande engagée de façon que la pression s'accumule et fasse ouvrir la soupape de sûreté. Prendre note de l'indication du manomètre lorsque la soupape de sûreté se déclenche et, si cette pression n'est pas la bonne, la régler en tournant la vis de réglage dans le sens horaire pour augmenter la pression de déclenchement ou dans le sens anti-horaire pour la réduire.

Sélecteurs de débit

Pour diviser le débit d'un fluide dans une plomberie ordinaire, on utilise couramment un raccord en T. Dans le cas des circuits hydrauliques, quand deux applications différentes ou plus se produisent simultanément, il serait inadéquat d'employer un raccord en T ordinaire car le débit se dirigerait toujours du côté offrant le moins de résistance. Par conséquent, on utilise un clapet sélecteur de débit. Ce dispositif est, en réalité, un raccord en T muni d'un dispositif équilibreur de pression intégré qui dirige le débit lorsque nécessaire, quelle que soit la pression de chaque côté. Il y a deux types de sélecteurs de débit: le sélecteur de débit proportionnel et le sélecteur prioritaire.

Sélecteur de débit proportionnel

Lorsque le débit d'une pompe doit être divisé dans une proportion donnée, habituellement

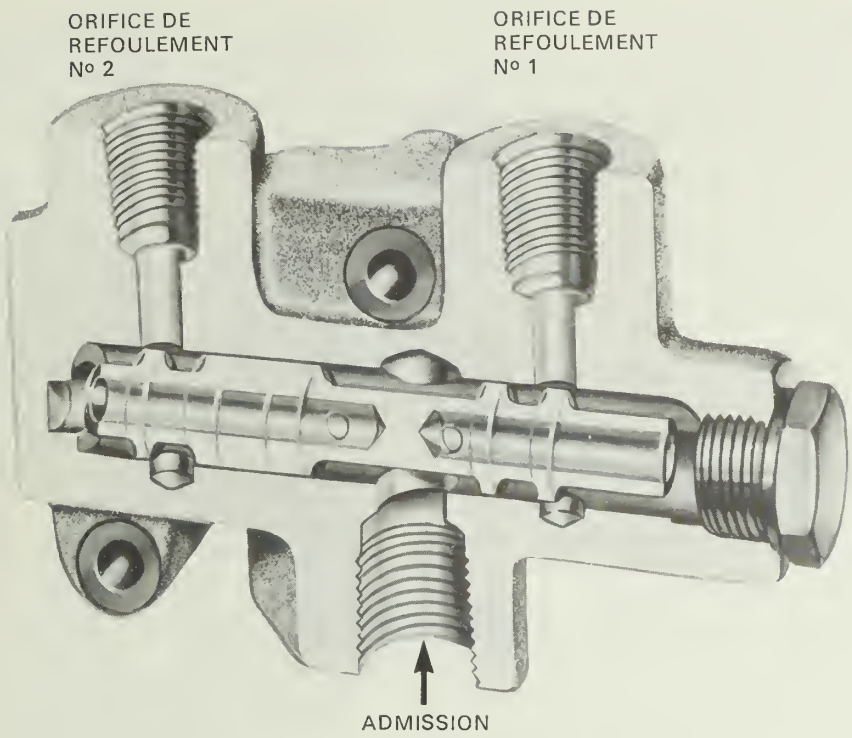


Figure 23. **Coupe d'un sélecteur à débit proportionnel.**

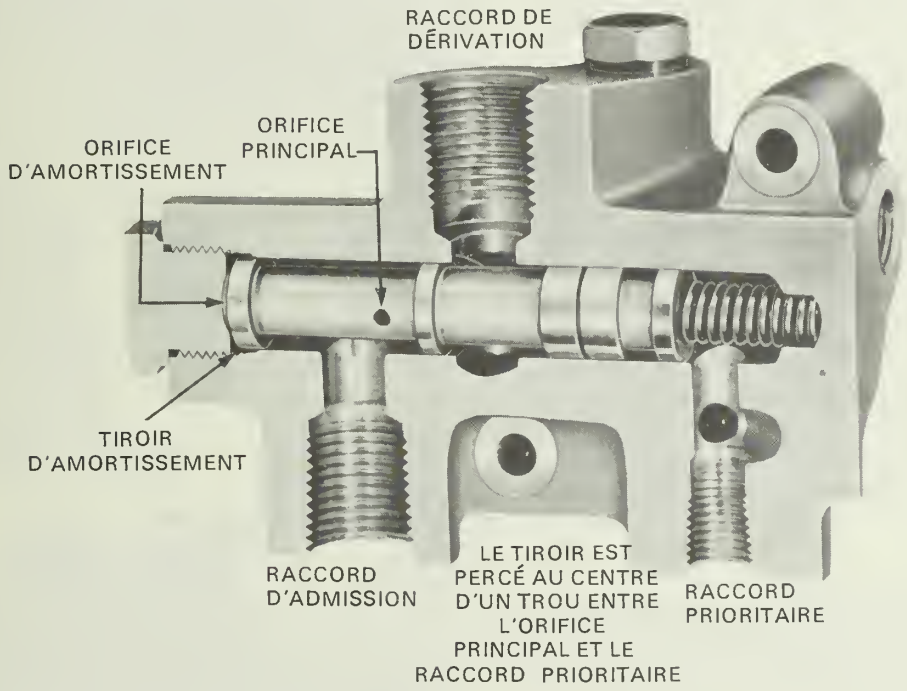


Figure 24. **Coupe d'un sélecteur à débit prioritaire.**

moitié-moitié, on utilise un sélecteur à débit proportionnel. Dans la soupape illustrée, (fig. 23), le tiroir est libre de se déplacer vers le côté offrant le moins de résistance. Si la pression augmente à l'orifice de refoulement n° 1, l'huile a tendance à se diriger vers l'orifice de refoulement n° 2 (étant donné que l'huile se dirige toujours du côté offrant le moins de résistance). Cependant, l'accroissement de la pression du côté droit du tiroir fera déplacer ce dernier vers la gauche, ce qui a pour effet d'obstruer l'orifice de refoulement n° 2. De cette façon, tout accroissement de débit par l'orifice n° 2 est annulé et ainsi, quelle que soit la pression, le débit de chaque orifice reste proportionnel à l'autre.

Sélecteur à débit prioritaire

Dans le cas de nombre de circuits, une quantité pré-réglée d'huile doit être prélevée du débit principal pour alimenter un utilisateur séparé, comme une servo-direction. Cela veut dire que si le débit prioritaire doit être de 10 L/min, l'orifice du débit prioritaire doit recevoir 10 L/min, quel que soit le débit total du circuit. Toute quantité d'huile faisant passer le débit à plus de 10 L/min doit être dérivée.

La figure 24 illustre un sélecteur à débit prioritaire. Le ressort maintient le tiroir à gauche et l'huile admise essaie de se rendre à l'orifice de refoulement prioritaire par l'orifice principal du tiroir. Toutefois, à mesure que l'écoulement s'accroît dans l'orifice, la différence de pression créée par le débit entraîne une pression plus élevée à l'extrémité gauche du tiroir qu'à son extrémité droite. Lorsque cet accroissement de pression dépasse la résistance du ressort, le tiroir se déplace vers la droite et découvre l'orifice de dérivation. Ainsi, c'est la tension du ressort qui contrôle le débit provenant de l'orifice prioritaire. Pour pouvoir régler le débit prioritaire, on peut ajouter au ressort régulateur de ces soupapes une vis de réglage.

Amortisseur de vibrations

Nombre de soupapes sont munies d'un orifice d'amortissement (fig. 24). Ce dispositif empêche le tiroir de vibrer en emprisonnant de l'huile à l'extrémité du tiroir et en permettant son écoulement par un très petit orifice. Le principe utilisé est semblable à celui des amortisseurs de voitures. L'huile ne s'échappe que lentement par l'orifice et empêche ainsi le tiroir de vibrer. Ce petit orifice peut être obstrué par de la saleté pouvant gripper le tiroir en position ouvert ou fermé. Lorsqu'un tiroir ne fonctionne plus, vérifier que l'orifice d'amortissement n'est pas obstrué.

CIRCUITS HYDRAULIQUES MONTÉS EN SÉRIE ET EN PARALLÈLE

«Décharge» de la pompe

Étant donné que les pompes utilisées sur les tracteurs, les machines agricoles et l'équipement mobile fonctionnent tant que le moteur tourne, il est nécessaire de «décharger» ces pompes de façon qu'elles ne subissent pas de contraintes excessives lorsqu'on ne les utilise pas. On peut décharger une pompe en modifiant le deux caractéristiques suivantes: pression ou débit. Si une pompe est à débit invariable, on doit permettre à l'écoulement de circuler lorsque la pompe n'est pas utilisée. Ceci peut se faire en annulant la pression et en permettant à l'huile de retourner librement à la bâche, le distributeur étant en position neutre. Si la pompe est asservie, comme c'est le cas dans la fig. 9, on peut maintenir la pression et annuler le débit.

Les méthodes de décharge de pompes mentionnées ci-dessus sont appliquées en fonction du type de la pompe et du distributeur. Les définitions qui suivent devraient aider le lecteur à comprendre ces deux types de circuits.

1. Un circuit monté en série étant au neutre a un débit maximal mais une pression nulle.
2. Un circuit monté en parallèle étant au neutre a une pression maximale mais un débit nul.

Distributeurs

Les distributeurs sont les commutateurs d'un circuit hydraulique. Ils permettent à l'huile d'être canalisée d'un cylindre à l'autre, de soulever et d'abaisser des vérins ou d'envoyer l'huile à un moteur hydraulique. Les régulateurs sont habituellement de type rotatif ou à tiroir.

Le distributeur doit être conçu de façon à bien s'intégrer au circuit dont il fait partie, étant donné qu'il doit accomplir plusieurs tâches en

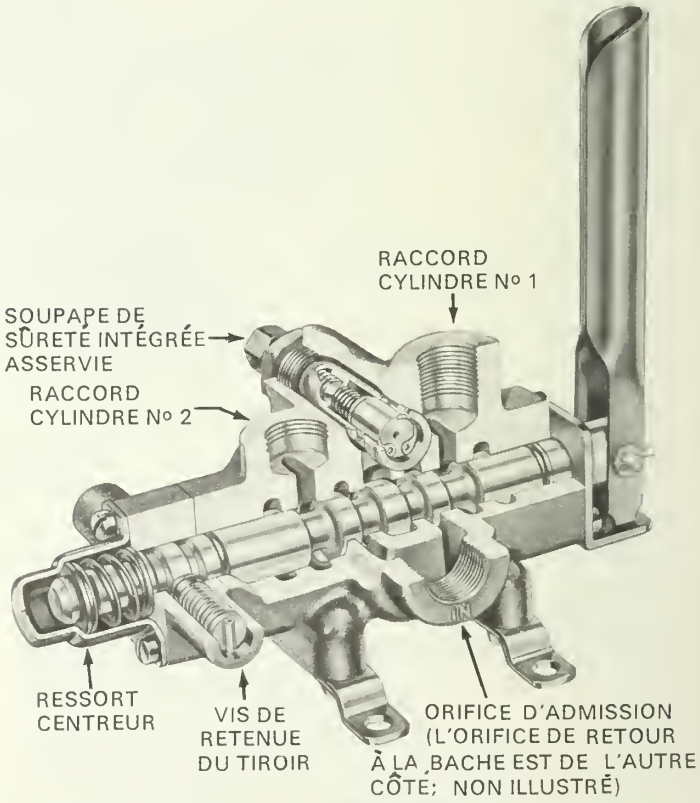


Figure 25. Coupe d'un distributeur typique à tiroirs à passage central mixte.

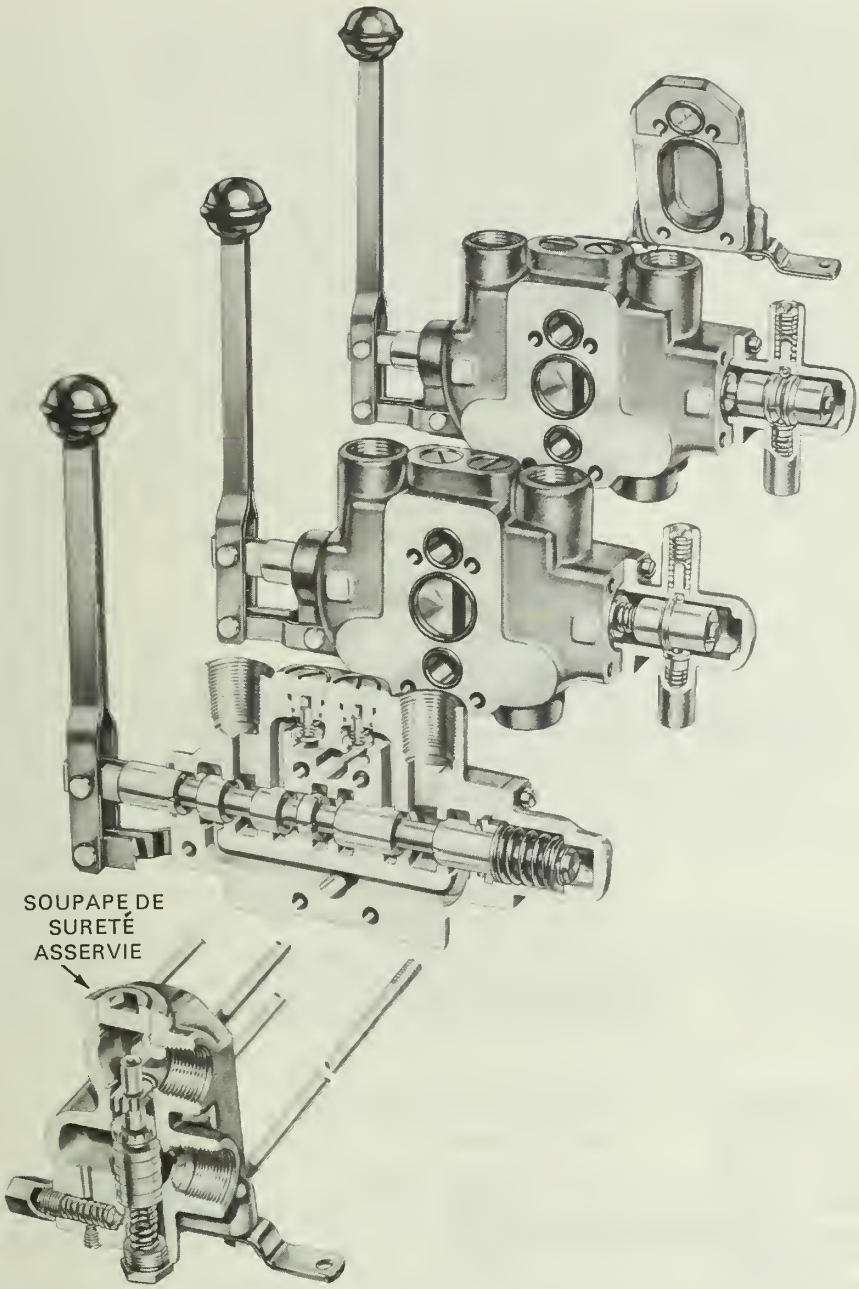


Figure 26. Coupe de plusieurs distributeurs à tiroirs.

plus d'alimenter les divers éléments du circuit. Une de ces tâches est la «décharge» de la pompe.

On désigne les distributeurs par le type de passage central et par le nombre de tâches qu'ils accomplissent. Le passage central se rapporte au trajet de l'huile dans le distributeur lorsque ce dernier est en position neutre. On désigne ainsi les distributeurs: à passage central ouvert, à passage central bloqué ou à passage central mixte. Si le distributeur comporte quatre orifices, on l'appelle distributeur à quatre voies. Ces quatre voies sont (1) un orifice de pression ou d'admission, (2) un orifice de retour à la bâche, et (3 et 4) deux orifices d'alimentation de vérin ou de moteur. Un distributeur à trois voies comporte habituellement un orifice d'admission, un orifice de retour à la bâche et seulement un orifice d'alimentation de vérin ou de moteur.

Distributeurs à tiroir

Les distributeurs peuvent être de type rotatif ou à tiroir; cependant, les distributeurs à tiroir (fig. 25) sont de loin les plus utilisés dans les machines agricoles étant donné qu'on peut facilement les grouper pour des applications multiples (fig. 26).

C'est le tiroir qui, à l'intérieur du distributeur, détermine le type de blocage central et le passage de l'huile à chacune des positions du distributeur. Les distributeurs à tiroir illustrés plus bas sont tous intégrés au même distributeur; seul le tiroir est modifié pour accomplir les diverses fonctions.

Distributeur à passage central ouvert

La fig. 27 illustre un distributeur à passage central ouvert en position neutre. Étant donné que le passage central est pleinement ouvert, les quatre orifices sont ouverts lorsque le distributeur est en position neutre. De cette façon, l'écoulement de la pompe peut retourner à la bâche sans restriction et les deux orifices destinés aux utilisateurs n'entravent pas le va-et-vient de l'huile. Ce type de distributeur est habituellement utilisé avec les moteurs hydrauliques ou les vérins dont il n'est pas nécessaire de maintenir la position lorsque le distributeur est en position neutre. On désigne souvent un distributeur à passage central ouvert par «distributeur à passage central moteur», étant donné qu'il permet, en position neutre, au moteur hydraulique intégré au circuit de tourner librement.

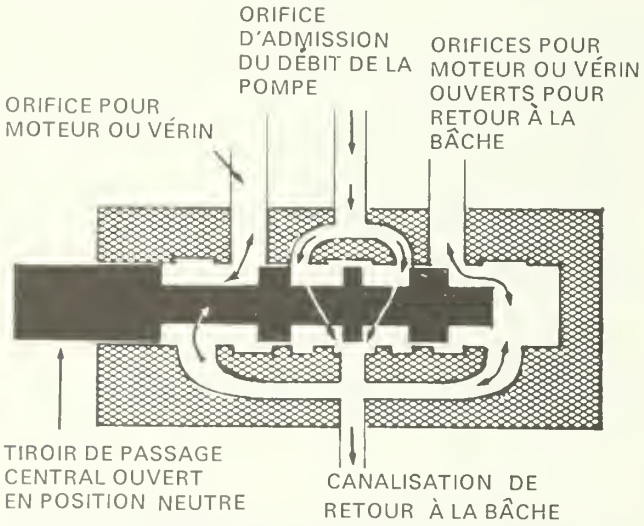


Figure 27. Diagramme d'un distributeur à tiroirs à passage central ouvert. Lorsque le tiroir est en position neutre, les orifices pour vérins sont ouverts contrairement à ceux d'un distributeur à passage central mixte. Pour le reste le fonctionnement des deux distributeurs est semblable.

Distributeurs à passage central mixte

Le distributeur à passage central mixte est le plus communément utilisé avec les vérins. Son fonctionnement est semblable à celui du distributeur à passage central ouvert, sauf que les orifices pour les vérins sont bloqués lorsque le tiroir est en position neutre de façon à maintenir le vérin en position. On désigne ce type de distributeur par «passage central mixte» parce que le tiroir effectue le travail du tiroir d'un distributeur à passage central ouvert et d'un distributeur à passage central fermé. En effet, le passage de l'huile de la pompe vers la bâche est ouvert comme dans le cas du distributeur à passage central ouvert mais les orifices pour les vérins sont fermés comme dans le cas d'un distributeur à passage central fermé. Un circuit hydraulique doté d'un distributeur à passage central mixte est décrit comme étant un *circuit* à passage central ouvert car l'écoulement de la pompe est libre de retourner à la bâche lorsque le distributeur est en position neutre.

Dans la figure 28, on peut voir un circuit à passage central ouvert muni de deux distributeurs à passage central mixte branchés en série. Le distributeur n° 1 est en position neutre: l'huile provenant de la pompe peut passer librement dans le distributeur mais les orifices des vérins sont bloqués afin de maintenir ces derniers en position. Le tiroir du distributeur 2 a été déplacé vers la droite, ce qui a pour effet de diriger l'huile à l'extrémité de la tige du vérin de façon qu'il reprenne sa position rentrée. De cette façon, l'huile à l'autre extrémité du vérin peut retourner à la bâche. Si on déplacait le tiroir vers la gauche, le vérin sortirait.

Distributeur à passage central fermé

Lorsque le distributeur à passage central fermé est en position neutre (fig. 29, distributeur n° 2), tous ses orifices de service sont bloqués: l'huile ne circule plus ni dans un sens ni dans l'autre dans le distributeur. Étant donné que le débit de la pompe est complètement bloqué, la pompe doit être du type asservie afin de réagir à l'accroissement de la pression en déplaçant ses pistons ou ses palettes hors-circuit de façon à annuler l'écoulement. Lorsque ce type de distributeur est en position neutre, une haute pression est maintenue dans la canalisation reliant la pompe au distributeur et on obtient ainsi une réponse très rapide lorsque le tiroir est déplacé en position de service. La fig. 29 (distributeur n° 1) montre que le tiroir, qui a été déplacé vers la gauche, permet au débit de faire sortir le vérin et dirige l'huile de retour vers la bâche. Les deux distributeurs de la fig. 29 sont reliés en parallèle parce qu'ils sont à passage central fermé.

Distributeurs multiples

Lorsqu'on utilise un circuit hydraulique pour faire fonctionner plusieurs vérins, on simplifie les circuits en utilisant une série de distributeurs montés dans un seul boîtier, ou plusieurs boîtiers de distributeur vissés ensemble (fig. 26). De cette façon, on économise de l'espace et le dispositif est moins sujet aux problèmes de tuyauterie et aux fuites. En outre, de nombreux circuits sont munis de soupapes de sûreté et de clapets anti-retour intégrés en une seule soupape.

Circuits hydrauliques montés en série comparés aux circuits hydrauliques en parallèle

Étant donné qu'un circuit monté en série comporte moins de pièces et est moins coûteux, on l'utilise habituellement dans des installations simples servant à faire fonctionner un ou deux vérins.

Dans le cas d'outillage plus compliqué et des plus récents tracteurs de ferme, le circuit hydraulique accomplit plusieurs tâches diverses,

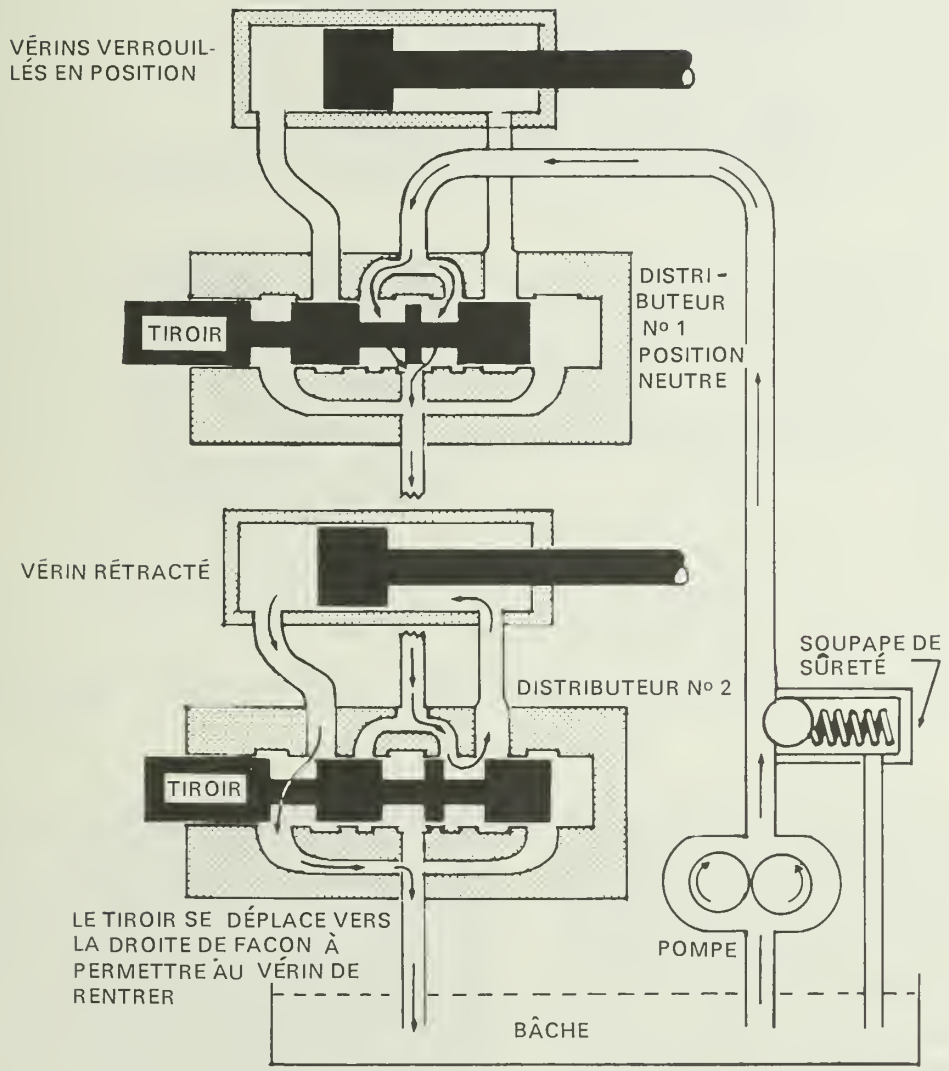


Figure 28. Diagramme d'un circuit à passage central ouvert, monté en série, comportant deux distributeurs à passage central mixte.

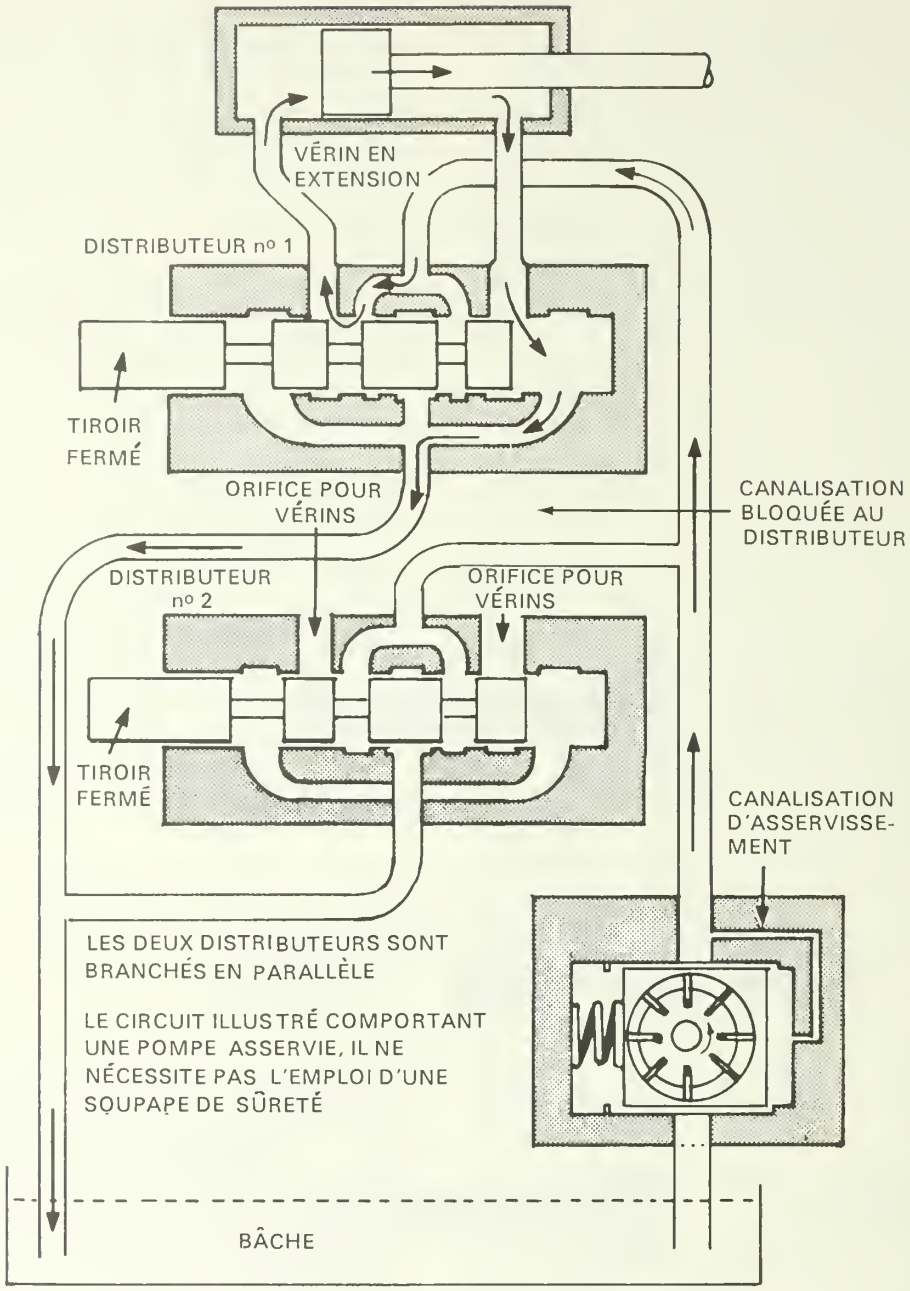


Figure 29. Diagramme d'un circuit à passage central fermé, monté en parallèle, comportant une pompe asservie.

souvent simultanément. Pour cette raison, on utilise plus fréquemment les circuits montés en parallèle car ils permettent une réponse rapide en tout point du circuit, sans compter que leur pompe ne subit pas de contrainte excessive lorsqu'on n'utilise le circuit hydraulique.

Circuits montés en série et en parallèle combinés

De nombreux circuits hydrauliques, particulièrement ceux des tracteurs, constituent une combinaison des divers circuits de façon à mieux répondre aux besoins spécifiques auxquels ils doivent satisfaire. La fig. 30 est un exemple simple de la façon dont on peut combiner ces circuits qui sont tous alimentés par une pompe à débit fixe. Le circuit illustré, à partir de la pompe, y compris le distributeur, la servo-direction jusqu'au clapet anti-retour peut être considéré comme un circuit monté en série car le débit de la pompe est constant et l'huile peut retourner librement à la bâche lorsqu'elle n'est pas utilisée. Cependant, le circuit qui commence après le clapet anti-retour, y compris les distri-

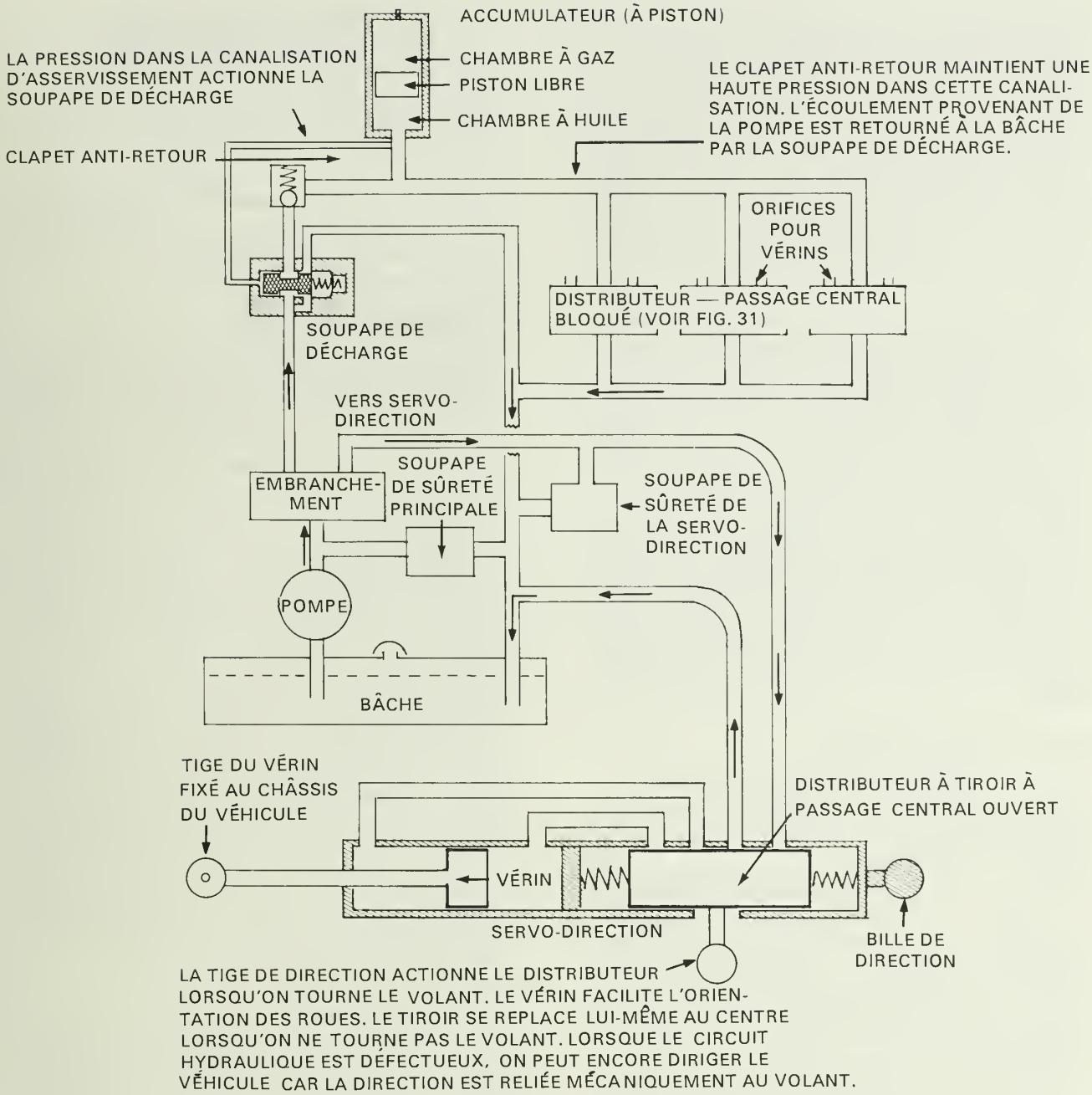


Figure 30. Diagramme typique d'un circuit hydraulique combiné comprenant un circuit en série et un circuit en parallèle.

buteurs, est un circuit monté en parallèle assurant une haute pression stable dans les canalisations lorsque les distributeurs sont en position neutre. Cela est possible car un clapet anti-retour isole les deux circuits et la soupape de décharge, qui réagit à la pression de l'accumulateur, fait dériver l'écoulement de la pompe à la bâche. Lorsqu'on déplace le tiroir d'un distributeur, la pression tombe de l'accumulateur et de la canalisation d'asservissement; à ce moment, le ressort du clapet de décharge regroupe le clapet vers la gauche, ce qui permet au débit de la pompe d'ouvrir le clapet anti-retour, d'alimenter le circuit et de recharger l'accumulateur. Dans ce circuit, l'accumulateur permet une réponse extrêmement rapide lorsqu'un distributeur est actionné.

ACCUMULATEURS

Un accumulateur est un dispositif pouvant emmagasiner une quantité d'huile sous pression et la relâcher sur demande. On utilise parfois des accumulateurs pour amortir les sautes de pression ou les coups de bélier se produisant dans

le circuit. Un pneu, ou un ballon, est en réalité un accumulateur qui emmagasine de l'air sous pression; cela est possible parce que l'air est compressible. Étant donné que l'huile n'est pas compressible, on ne peut la faire entrer de force dans un contenant plus petit que son propre volume. Pour emmagasiner de l'huile sous pression, il est nécessaire d'utiliser un autre fluide compressible, comme du gaz ou de l'air. Il existe des accumulateurs à ressort ou à poids mais on ne les rencontre pas souvent dans l'équipement agricole.

En cloisonnant la chambre de l'accumulateur avec soit un piston (fig. 30) ou une membrane, on peut emmagasiner l'huile séparément du gaz tout en la maintenant sous pression grâce à la compressibilité du gaz. Plus on pompe de l'huile dans l'accumulateur, plus on force le gaz à se comprimer. Plus le gaz se comprime, plus la pression augmente. Par conséquent, la pression de l'huile augmente elle aussi proportionnellement à la pression du gaz. La pression de l'huile et la pression du gaz sont toujours égales, étant donné que le piston libre où la membrane demeurent toujours en équilibre entre les deux fluides.

Accumulateur préchargé

On peut précharger le compartiment de l'accumulateur réservé au gaz de façon à créer une pression minimale d'accumulation d'huile. La pression de précharge est déterminée selon l'utilisation de l'accumulateur. On précharge un accumulateur en utilisant un réservoir pressurisé contenant le gaz requis dans l'accumulateur. On branche le réservoir à l'accumulateur et on laisse le gaz s'accumuler dans ce dernier jusqu'à ce que, à l'aide d'un manomètre, on vérifie que la pression requise est atteinte.

Attention: un accumulateur peut être dangereux. On doit le charger avec le gaz approprié; ce gaz est habituellement de l'azote sec.

Ne jamais charger un accumulateur d'oxygène. Une dangereuse explosion pourrait résulter du mélange sous pression de l'huile et de l'oxygène.

Ne jamais charger un accumulateur d'air. L'humidité de l'air se condensera dans l'accumulateur et la corrosion fera gripper ce dernier.

Ne jamais charger un accumulateur à une pression supérieure aux spécifications du fabricant. Une explosion pourrait se produire.

Ne jamais déposer ou réparer un accumulateur sans avoir d'abord déchargé la pression du gaz et la pression hydraulique.

DISPOSITIFS D'ATTELAGE TROIS POINTS

Les tracteur de ferme utilisent un attelage trois points actionné par une combinaison de raccordements hydrauliques et mécaniques. Les distributeurs sont actionnés manuellement et automatiquement par un dispositif d'asservissement géométrique ou dynamique. Les deux dispositifs sensibles sont appelés «commande de position» et «commande de l'effort».

Commande de position

La commande de position est parfois appelée «contrôle de profondeur». Il s'agit d'une méthode pour maintenir le dispositif de levage arrière et l'instrument qui y est attaché à une profondeur constante *par rapport au châssis du tracteur.* Le distributeur qui fait lever et baisser l'attelage arrière est commandé de deux points. D'abord, il est relié à un levier de commande manuelle que l'opérateur déplace sur un secteur (quart de cercle). Deuxièmement, le même distributeur est commandé par une bague en forme de came fixée au levier de renvoi qui tourne lorsque le dispositif de levage est levé ou baissé. Lorsque le dispositif est levé, la tringlerie a «priorité» sur la commande manuelle et arrête le dispositif de levage à une position déterminée par la position du levier de commande du secteur. La commande manuelle comprend une butée qui sert de «mémoire» de façon que le levier revienne chaque fois à la même position sans intervention de l'opérateur. La position du dispositif de levage arrière correspond toujours à la position du levier de commande sur le secteur.

Commande de l'effort

Le terme «effort» désigne la résistance de l'outil traîné. La commande de l'effort est un dispositif dont on munit un tracteur pour lever ou baisser un outil, et pour maintenir une résistance uniforme. Dans ce cas, comme pour la commande de position, le distributeur qui fait lever et baisser le dispositif de levage arrière est commandée de deux points. Premièrement, il est relié à un levier de commande s'articulant sur un secteur et deuxièmement, il est commandé par un ressort réagissant à la charge et ayant priorité sur la tringlerie de commande manuelle. Certains tracteurs utilisent le même levier de secteur pour les commandes de position et d'effort alors que d'autres sont munis de leviers séparés. Le ressort sensible à la charge peut être relié soit au bras supérieur soit aux bras inférieurs de l'attelage trois points, mais d'une façon ou de l'autre, il réagit à une augmentation ou à une réduction de la résistance de l'outil. Lorsque la charge com-

mence à s'accroître, le ressort fait déplacer le tiroir du distributeur et l'outil se soulève. De plus, l'outil ne se soulève que jusqu'à ce qu'il rencontre la résistance initiale. Lorsque la résistance décroît, le ressort se détend et fait baisser l'outil plus profondément dans le sol.

Commande d'effort ou de position — Laquelle faut-il utiliser?

La plupart des tracteurs de ferme sont munis d'une commande de position et d'une commande d'effort pour les outils attelés; toutefois, certains opérateurs de tracteur ne comprennent pas complètement le rôle de ces deux dispositifs et n'en profitent pas suffisamment. Examinons maintenant le rôle et le fonctionnement des deux dispositifs lorsqu'on les utilise avec une charrue à soc portée.

On doit se souvenir que la commande de position maintient un rapport constant entre la position de l'attelage arrière et le châssis du tracteur. Ce dispositif ne «sent» pas la profondeur ni l'effort de la charrue dans le sol. Sur un terrain plat ayant un sol uniforme, la commande de position maintient la charrue à une profondeur égale. Sur un terrain ondulant ou cahoteux, le contrôle de position fait varier la profondeur de la charrue en réagissant au mouvement des roues avant sur le terrain inégal. Lorsque les roues avant sont soulevées, la charrue à l'arrière du tracteur descend plus profondément dans le sol; lorsque les roues avant descendent dans un trou, la charrue réagit en se soulevant, ce qui entraîne un sillon peu profond. Pour régler le problème que constitue un terrain inégal, il faut utiliser la commande d'effort asservie. Lorsque la charrue tend à descendre plus profondément à cause du soulèvement des roues avant, l'effort accru fera soulever l'attelage arrière par rapport au tracteur et maintiendra ainsi la charrue à une profondeur égale. La charrue continuera à monter et à descendre au besoin pour que la résistance demeure la même.

La situation peut être plus compliquée lorsque le terrain présente un sol de glaise ou un sol varié. Si la commande d'effort est utilisée dans ce cas, la charrue se soulève chaque fois qu'elle rencontre une surface de glaise. Cela est dû au fait que, lorsque la commande d'effort est actionnée, le levage s'effectue par réaction à une augmentation de résistance découlant de conditions de labour plus difficiles. De nombreux opérateurs utilisent la commande d'effort dans ce cas car elle facilite le déplacement du tracteur sans qu'il ne se produise de variation sensible dans la résistance ou la traction; toutefois, il faut dire que dans ce cas, *le sol dur n'est pas labouré* et, si on utilise la commande d'effort chaque saison sur le même terrain, le sol dur ne sera jamais labouré. Par conséquent, lorsqu'il faut labourer un sol de ce type, les résultats seront meilleurs si on utilise la commande de position et non celle de l'effort, même si on rencontre certaines difficultés en sol dur nécessitant un rapport de traction plus bas pour tirer la charrue dans un sol plus dur.

Vitesse de réaction réglable

Un grand nombre de tracteurs sont équipés d'une commande réglable appelé commande de «vitesse de réaction» du levage arrière. Cette soupape est un simple distributeur réglable (fig. 24) intégré à la canalisation d'alimentation du vérin. En faisant dériver à la bâche une fraction de l'alimentation du vérin, ce dispositif permet de ralentir la vitesse de réaction du vérin. Lorsque le levage arrière est asservi à l'effort, la vitesse de réaction aux variations de résistance est ralentie, ce qui représente un avantage lorsqu'on laboure certains sols, particulièrement les sols rocheux où il est préférable que la charrue ne se soulève pas chaque fois qu'elle rencontre une pierre.

DIRECTIONS ASSISTÉES

Les deux principaux types de directions assistées utilisés sur les tracteurs et les machines agricoles sont: la servo-direction partielle et la servo-direction entièrement hydraulique.

Servo-direction partielle Dans le cas de la servo-direction partielle, le véhicule est muni d'une direction mécanique normale à laquelle s'ajoute un dispositif hydraulique pour aider à tourner les roues. Toutes les directions assistées des automobiles sont du type servo-direction partielle. Lorsque le volant est tourné, le mouvement initial de la tringlerie actionne une soupape hydraulique qui envoie l'huile dans un vérin relié à la tringlerie de direction. La soupape ne fonctionne que lorsque l'opérateur tourne le volant; lorsqu'il cesse de tourner le volant, le tiroir de la soupape reprend sa position centrale et les roues ne tournent plus. Dans la fig. 30, on voit un vérin de direction et la soupape; dans certains circuits, la soupape peut être séparée du vérin, dans d'autres circuits encore, la soupape et le vérin sont montés dans le boîtier de l'engrenage de direction.

Le circuit hydraulique servant au fonctionnement de la direction fait habituellement partie du circuit hydraulique principal du tracteur (fig. 30) mais on peut rencontrer aussi une pompe

séparée alimentant la servo-direction seulement comme dans le cas d'une automobile.

Servo-direction entièrement hydraulique La servo-direction entièrement hydraulique, qu'on appelle souvent direction «hydrostatique», ne comporte pas de tringlerie mécanique entre le volant et les roues du véhicule. La direction du véhicule est complètement commandée par l'énergie hydraulique (fig. 31).

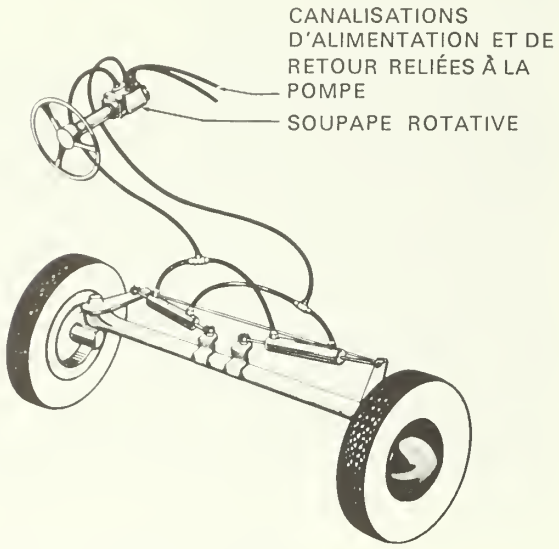


Figure 31. Système servo-direction entièrement hydraulique.

Le volant est relié directement à un dispositif hydraulique pompe-soupape. Lorsque le conducteur tourne le volant, la soupape rotative envoie le fluide hydraulique dans le vérin relié aux roues du véhicule. Cette soupape nécessite un léger effort continu de la part du conducteur pour continuer à fonctionner. Lorsque le moteur ne tourne pas, le dispositif pompe-soupape devient une pompe manuelle et envoie l'huile à un vérin pour permettre de diriger le véhicule.

FLUIDES HYDRAULIQUES

Rôles du fluide hydraulique

Tout d'abord, le fluide hydraulique doit pouvoir transmettre l'effort qu'on exerce sur lui. Il doit lubrifier les pièces internes mobiles des pompes, vérins, moteurs et soupapes et assurer le refroidissement des pièces mobiles. Dans bien des cas, le fluide sert à étanchéifier le circuit. Dans certains tracteurs, le liquide utilisé dans le circuit hydraulique doit aussi graisser des engrenages, des roulements, etc. de la transmission. Il doit pouvoir conserver sa viscosité sur une plage de température étendue. Il doit pouvoir résister à l'oxydation, protéger les pièces contre la rouille et la corrosion et se purger rapidement de l'air et de l'eau.

Effets de l'utilisation de la mauvaise huile

Une mauvaise viscosité de l'huile peut donner lieu à une contre-pression dans le circuit due à la résistance de l'huile. L'oxydation de l'huile peut causer la décomposition de pièces métalliques et de joints (l'oxydation se produit lorsque le fluide se combine avec de l'oxygène pour former des acides organiques qui peuvent endommager les métaux et les joints). Le moussage de l'huile peut causer nombre de problèmes dans un circuit hydraulique. Étant donné que l'huile n'est pas compressible alors que l'air l'est, le fonctionnement des vérins et des moteurs sera hésitant ou irrégulier s'il y a de l'air dans le circuit. Les effets d'une mauvaise lubrification et d'une mauvaise protection contre la rouille sont évidents. Une huile trop consistante peut causer la cavitation (fonctionnement de la pompe à vide) par temps froid étant donné que l'huile trop consistante ne s'écoulera pas librement dans la canalisation d'admission.

Choix et utilisation des liquides hydrauliques

Le fabricant de tout dispositif hydraulique effectue des recherches considérables pour choisir l'huile la mieux adaptée à la machine qu'il produit. Le manuel d'entretien fourni avec chaque machine spécifie l'huile qu'il faut utiliser. Il est très peu sage de ne pas respecter les recommandations du fabricant car l'huile choisie peut comporter certaines faiblesses pouvant être à la source de certains des problèmes mentionnés ci-dessus.

Après avoir choisi l'huile appropriée, l'étape la plus importante à suivre est de bien l'utiliser. Les pires ennemis d'un circuit hydraulique sont la saleté et la contamination. La saleté peut souvent pénétrer dans un circuit hydraulique à travers l'orifice du filtre à huile lorsqu'on effectue l'entretien de la machine.

En vérifiant l'huile d'un circuit, essuyer toute saleté pouvant se trouver autour du bouchon et de la cheminée de remplissage avant de dévisser le bouchon. Prendre la même précaution en ouvrant le baril d'huile ou le bidon. Effectuer le remplissage à l'aide d'un entonnoir à grille et remettre immédiatement en place les couvercles de la bâche et du bidon d'huile.

Entretien courant

Le circuit hydraulique fonctionnera longtemps et sans problème s'il contient toujours la bonne quantité d'une huile propre. Vérifier fréquemment les niveaux d'huile pour que le circuit ne fonctionne pas avec une quantité insuffisante d'huile, et si l'huile paraît plus épaisse ou sale, changer l'huile ainsi que les filtres. Toujours consulter le manuel d'entretien pour l'entretien courant recommandé des filtres et de l'huile.

DÉPANNAGE DES CIRCUITS HYDRAULIQUES

Les circuits hydrauliques des tracteurs et des machines agricoles sont bien conçus, efficaces et nécessitent relativement peu de réparations; toutefois, comme toute machine, ils présentent parfois des défaillances qu'il faut corriger. Étant donné que tous les circuits hydrauliques sont constitués de composants comme des pompes, des soupapes, des vérins, des moteurs, etc. reliés entre eux par des tuyaux, des flexibles ou des collecteurs, il est parfois difficile de localiser ces défaillances. Contrairement à nombre de défaillances mécaniques, on ne peut voir les défaillances et leurs causes dans un circuit hydraulique en fonctionnement.

Même si la pompe peut être considérée comme le coeur du circuit hydraulique, elle n'est habituellement pas la cause de défaillances. Lorsqu'on répare des circuits, on commet le plus souvent l'erreur de sauter à des conclusions sur la cause de la panne sans la localiser correctement. De cette façon, la pompe est souvent remplacée ou révisée alors qu'elle n'est pas vraiment défectueuse. La compréhension des points fondamentaux suivants aidera à localiser les pannes: un circuit hydraulique présente deux caractéristiques fondamentales pouvant nuire à son fonctionnement: le débit et la pression. Le débit est l'écoulement de l'huile créé par la pompe; la pression s'exerce sur l'huile lorsque le débit rencontre une résistance provoquée par la charge ou le travail effectué. Si la panne se présente sous la forme d'une perte de puissance ou de capacité de levage, la panne peut être imputée à la pression. Si la panne se présente sous la forme d'une perte de vitesse de fonctionnement ou d'un levage ralenti, il s'agit du débit.

Pour le dépannage d'un circuit hydraulique complet, suivre les étapes qui suivent.

1. Déterminer si la panne est due à une perte de débit ou à une perte de pression. Pour cela, faire fonctionner le circuit d'abord sans charge et ensuite avec une charge. Si le circuit fonctionne normalement sans charge mais s'avère défectueux avec une charge, la panne doit être imputée à la pression. Si le circuit fonctionne lentement avec ou sans charge, la panne doit être imputée au débit.

2. Si la panne est due à un débit affaibli, appliquer les instructions suivantes dans l'ordre:

   (a) Huile dans la bâche — la bâche doit contenir suffisamment d'huile pour que la pompe reçoive de l'huile en tout temps et qu'elle ne pompe jamais d'air.

   (b) Huile trop épaisse ou trop sale — une huile trop consistante ou trop sale ne s'écoulera pas librement dans la pompe et par conséquent, réduira le débit de cette dernière. Toujours utiliser une huile hydraulique de qualité comme le recommande le fabricant de la pompe.

   (c) Canalisation d'alimentation de la pompe étranglée — la pompe ne peut pas pomper plus d'huile que la quantité qui s'y rend facilement. Un filtre d'admission obstrué ou sale réduira par conséquent le débit de la pompe.

   (d) Canalisation d'admission présentant une fuite — une canalisation d'alimentation de la pompe craquée ou mal raccordée permet à l'air d'entrer dans la pompe avec l'huile ou à la place de cette dernière; il en résulte une réduction du débit et le moussage de l'huile. Lorsque l'huile mousse, le fonctionnement du circuit hydraulique est hésitant, saccadé et bruyant.

   (e) Canalisations de pressions ou soupapes ou vérins présentant une (ou des) fuite(s) — il se peut que le débit de la pompe soit normal mais qu'il se produise des pertes dans les canalisations de pressions. Les fuites de canalisation interne sont difficiles à localiser sans l'utilisation d'un débitmètre mais on peut parfois les voir à travers les orifices d'inspection des tracteurs.

   (f) Si tous les composants mentionnés ci-dessus sont en bon état et si le débit est toujours réduit, la panne est due à la pompe. Démonter la pompe pour la réparer.

3. Si la panne se présente sous la forme d'une perte de pression, vérifier les points suivants dans l'ordre:

   (a) Il se peut que la soupape de sûreté soit grippée en position partiellement ouverte (habituellement, cela est causé par la présence de saleté dans le circuit) ou qu'elle s'ouvre à une pression trop basse. Pour régler la soupape de sûreté, il est nécessaire d'utiliser un manomètre et de savoir la pression maximale du circuit. Le manomètre étant relié à la canalisation de pression (canalisation de refoulement de la pompe) à l'aide d'un raccort en T, faire fonctionner un distributeur pour faire déplacer un vérin jusqu'au bout de sa course et lire l'indication du manomètre. Si la soupape de sûreté s'ouvre à une pression trop basse, nettoyer et régler ou remplacer la soupape de sûreté.

   (b) Si le manomètre indique que la pression est inférieure à la pression maximale et que la soupape de sûreté ne s'ouvre pas, alors ou le débit s'échappe ailleurs ou bien la pompe fait défaut lorsqu'elle est sous pression. Pour déterminer laquelle de ces éventualités est la bonne, il peut être nécessaire de débrancher et de rebrancher la canalisation de sortie du distributeur ou, si possible, la canalisation située immédiatement après la soupape de sûreté. Si la pression est maintenant normale, la cause de la panne est dans la partie du circuit qui a été débranchée. Si la pression est toujours basse, la cause de la panne est à la pompe.

4. Des fuites peuvent se produire aux garnitures des pistons des vérins, ce qui peut ralentir le levage d'un vérin chargé, permettre au vérin de céder lorsqu'il est chargé ou causer une accumulation anormale de pression dans le circuit lorsqu'il est chargé. Il est facile de localiser une fuite dans un vérin à effet simple car on peut voir l'huile provenant de la fuite au piston s'échapper du vérin. Dans le cas d'un vérin à double effet, un piston qui fuit n'est pas visible car les deux extrémités du vérin sont reliées au circuit hydraulique. La façon la plus facile de vérifier un vérin à double effet consiste à utiliser l'appareil qu'il actionne. Faire sortir complètement le vérin, arrêter le fonctionnement du circuit et débrancher le flexible ou le tuyau de l'extrémité du cylindre vers la tige du piston. Remettre le circuit sous pression et, la soupape étant actionnée par la sortie du vérin, laisser la pleine pression de l'huile s'exercer sur la soupape de sûreté. Si le piston fuit, l'huile s'échappera du raccord ouvert. S'il n'y a aucun indice de fuite, effectuer la vérification après avoir fait rentrer le vérin complètement et débran-

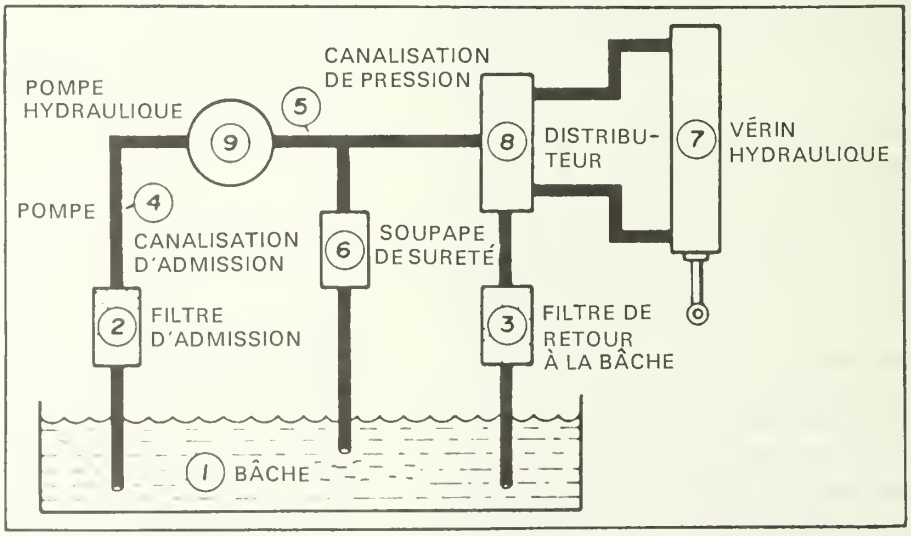


Figure 32. Ce diagramme montre la procédure à suivre pour localiser le défaut d'un système hydraulique sans l'aide d'un débitmètre.

ché l'autre canalisation. Cette deuxième vérification est nécessaire car les pistons fuient parfois dans une seule direction.

5. Pour vérifier si un distributeur présente une fuite interne, procéder de la façon suivante: si le boîtier du distributeur ne comporte pas de soupape de sûreté, il est facile de vérifier si ce dernier comporte des fuites internes en maintenant son tiroir en position ouverte de façon que l'huile fasse sortir complètement le vérin et, ensuite en débranchant du distributeur la canalisation de retour à la bâche et en observant finalement s'il se produit un écoulement d'huile. Si pendant que le vérin est toujours sous pression, cette canalisation laisse s'écouler de l'huile, le distributeur comporte une fuite. On ne peut effectuer cette vérification si la soupape de sûreté est située dans le boîtier de la soupape principale (distributeur) car, dans ce cas, la canalisation de retour à la bâche est aussi utilisée par la soupape de sûreté. Pour vérifier ce type de soupape, il est nécessaire de brancher un débitmètre ou un analyseur hydraulique au circuit et de vérifier si la soupape comporte une fuite à une pression inférieure à la pression de déclenchement de la soupape de sûreté.

L'illustration (fig. 32) indique dans l'ordre la procédure à suivre pour dépanner un circuit hydraulique sans l'aide d'un débitmètre. Si un débitmètre est utilisé, il faut vérifier la pompe en même temps que les canalisations d'admission et les filtres.

FACTEURS DE CONVERSION — MESURES MÉTRIQUES ET IMPÉRIALES

LONGUEUR

1 po (pouce) = 25,4 mm (millimètres)
1 mm = 0,03927 po
1 pi (pied) = 304,8 mm
1 mm = 0,0032 pi
1 v (verge) = 0,9144 m (mètres)
1 m = 1,0936 v
1 mi (mille) = 1,6093 km (kilomètres)
1 km = 0,6213 mi

SUPERFICIE

1 po^2 = 645 mm^2
1 mm^2 = 0,00155 po^2
1 pi^2 = 0,0929 m^2
1 m^2 = 10,76 pi^2

VOLUME

1 po^3 = 16380 mm^3
1 mm^3 = 0,00006 po^3
1 mL = 1000 mm^3
1 mL = 0,061 po^3
1 po^3 = 16,38 mL
1 gallon (imp.) = 4,54 L (litres)
1 L = 0,22 gal (imp.)
1 gallon (U.S.) = 3,7853 L
1 L = 0,264 gal (U.S.)
1 once liquide (imp.) = 28,4 mL
1 once liquide (U.S.) = 29,6 mL

VITESSE

1 pi/s (pied/seconde) = 3,048 mm/s
1 mm/s = 0,0032 pi/s
1 pi/s = 25,4 mm/s
1 mm/s = 0,039 po/s

PUISSANCE

1 ch (cheval vapeur) = 746 W (watts)
1 ch = 0,746 kW
1 kW = 1,34 ch

POIDS

1 oz (once) = 28 g (grammes)
1 g = 0,035 oz
1 lb (livre) = 0,453 kg (kilogrammes)
1 kg = 2,205 lb
1 t (tonne) = 1000 kg
1 tonne (2000 lb) = 0,907 t
1 tonne (t) = 1,1 ton

FORCE

1 lb-f (livre-force) = 4,448 N (newtons)
1 N = 0,2248 lb-f
1 kg-f (kilogramme-force) = 9,806 N
1 N = 0,1019 kg-f
1 dyne = 0,00001 N

COUPLE

1 pi-lb = 1,355 N•m (newton-mètres)
1 N•m = 0,738 pi-lb
1 po-lb = 0,1129 N•m
1 N•m = 8,85 po-lb

PRESSION

1 lb/po^2 = 6,89 kPa (kilopascals)
1 kPa = 0,145 lb/po^2
1 bar = 100 kPa
1 atmosphère = 101,325 kPa

CAPACITÉ

1 gal (imp.)/min = 4,54 L/min
1 L/min = 0,22 gal (imp.)/min
1 gal (U.S.)/min = 3,785 L/min
1 L/min = 0,264 gal (U.S.)/min
1 po^3/min = 0,273 mL/s

TEMPÉRATURE

degrés Fahrenheit = (°C ÷ 0,56) + 32
degrés Celsius = (°F − 32) × 0,56